SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Sinković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Martin Sinković

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, strpljenju i stručnom vođenju kroz izradu završnog rada.

Zahvaljujem asistentici dr. sc. Maji Jurici na velikoj pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Martin Sinković

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN SINKOVIĆ** Mat. br.:**0035190613**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MAG CBT ZAVARIVANJE S TROKOMPONENTNIM PLINSKIM MJEŠAVINAMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MAG CBT WELDING WITH THREECOMPONENT GAS MIXTURES**

Opis zadatka:

Opisati postupak MAG zavarivanja s posebnim naglaskom na način prijenosa metala u električnom luku. Analizirati CBT-Control Bridge Transfer prijenos metala u električnom luku i navesti osnovne prednosti i primjenu. Dati pregled zaštitnih plinova koji se koriste pri MAG zavarivanju i posebno obraditi trokomponentne mješavine argona, ugljičnog dioksida i kisika.

U eksperimentalnom dijelu osmisliti plan pokusa kako bi se mogle usporediti karakteristike električnog luka u CBT prijenosu uz primjenu trokomponentnih plinskih mješavina sastava 93% Ar, 1% O_2 i 6%CO_2 te 86% Ar, 2% O_2 i 12% CO_2 na više razina unosa topline. Analizirati dobivene rezultate i posebno komentirati stabilnost prijenosa u području prijelaznog luka.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje zavarivanja
Q	kJ/mm	Unos topline
R	Ω	Električni otpor
t	s	Vrijeme
U	V	Napon
$v_ž$	m/min	Brzina dodavanja žice
η	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
AC – CBT	Alternative Current – Controlled Bridge Transfer
Ar	Argon
CBT	Controlled Bridge Transfer
CBT – EX	Controlled Bridge Transfer – Expanded
CO	Ugljični monoksid
CO_2	Ugljični dioksid
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
EN-CBT	Electrode Negative - Controlled Bridge Transfer
Fe	Željezo
He	Helij
H_2	Vodik
KV	Konvencionalni način prijenosa metala
MAG	Metal Active Gas
MAG – M	Metal Active Gas Mixture
MAGi	Metal Active Gas, mixed arc
MAGk	Metal Active Gas, short arc
MAGp	Metal Active Gas, pulsed arc
MAGs	Metal Active Gas, spray arc
Mn	Mangan
N_2	Dušik
O_2	Kisik
Si	Silicij
WB	Welbee

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je: „MAG CBT zavarivanje s trokomponentnim plinskim mješavinama“. Sastoji se od dva dijela, teoretskog i praktičnog.

U teoretskom dijelu prikazan je MAG postupak zavarivanja s posebnim naglaskom na način prijenosa metala u električnom luku. Posebno je analiziran princip rada, podjela i izvor struje kod MAG CBT (Controlled Bridge Transfer) načina prijenosa metala. Opisani su zaštitni plinovi koji se koriste pri MAG zavarivanju, s naglaskom na argon, ugljikov dioksid i kisik te njihove mješavine. Nakon obrade teoretskog dijela, izveden je eksperimentalni rad.

U eksperimentalnom dijelu rada opisani su oprema, dodatni materijal i plinovi koji su bili korišteni. Osmišljen je plan pokusa kojim se mogu usporediti karakteristike električnog luka u CBT prijenosu uz primjenu trokomponentnih plinskih mješavina sastava 93 % Ar, 1 % O_2, 6 % CO_2 te 86 % Ar, 2 % O_2, 12 % CO_2 na 3 razine unosa topline te su analizirani dobiveni rezultati.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, CBT, trokomponentne plinske mješavine

SUMMARY

Topic of this final work is „MAG CBT welding with three-component gas mixtures“. It consists of two parts, theoretical and practical.

In the theoretical part MAG welding process is shown with special emphasis on the metal transfer in the arc. Working principle, classification and power source for MAG CBT (Controlled Bridge Transfer) method of metal transfer are specially analyzed. Shielding gases for MAG welding are described, especially Argon, Carbon Dioxide, Oxygen and their mixtures. After completion of the theoretical part, experimental part has been made.

Equipment, additional materials and shielding gases are described in the experimental part. Experiment plan was made so we could compare the characteristics of the arc in the CBT transfer metal method using three-component gas mixture: 93 % Ar, 1 % O_2, 6 % CO_2 and 86 % Ar, 2 % O_2, 12 % CO_2 on 3 heat input levels. After the experiment was done, the analysis of results has been made.

Key words: MAG welding, CBT, three-component gas mixture

1. UVOD

Zavarivanje je danas nezaobilazna tehnologija spajanja materijala u gotove proizvode koji su nužno potrebni čovjeku (automobili, kotlovi, brodovi, cjevovodi, platforme i ostale konstrukcije). Pred tehnologa zavarivanja su postavljeni različiti zahtjevi. Prije svega to su zahtjevi kvalitete i sigurnosti zavarenog spoja na konstrukciji, minimalnih troškova izrade, minimalnog utroška materijala i energije, te onečišćenja okoliša.

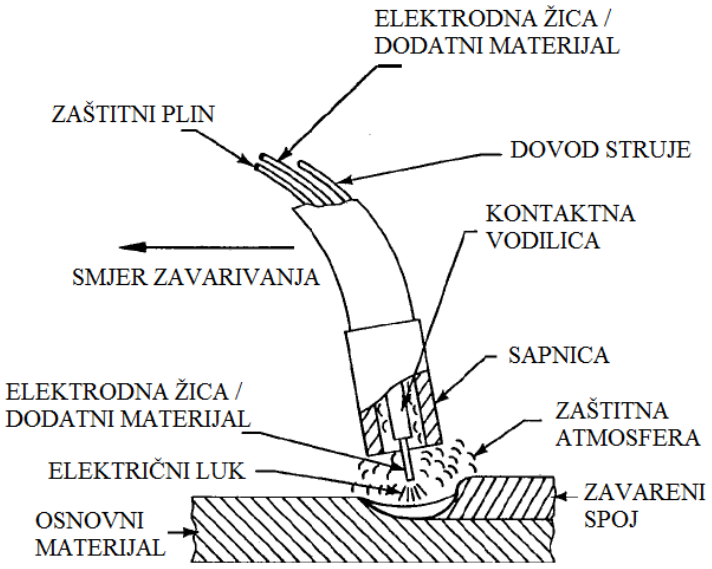
Zbog želje da se mnogi od tih zahtjeva zadovolje razvijen je MAG postupak zavarivanja. MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (MAG – Metal Active Gas). Postupak se razvio poslije 2. svjetskog rata u SAD-u za potrebe avioindustrije (tvrtka Airco), a kasnije i u SSSR-u gdje je prvi put upotrijebljen CO_2 kao zaštitni plin umjesto argona. MAG postupak zavarivanja je danas jedan od najčešće korištenih postupaka spajanja metala. Razvijen je zbog potrebe za produktivnijom i kvalitetnijom izradom zavarenih spojeva, a brzo se proširio zbog pogodnosti za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju procesa. Prema standardu HRN EN ISO 4063 MAG zavarivanje ima oznaku 135. Unatoč šezdesetogodišnjoj povijesti, MAG zavarivanje se i danas stalno unapređuje, u potrazi za što ekonomičnijim i kvalitetnijim izvođenjem samog postupka [1].

Razvojem velikog broja modificiranih postupaka MAG zavarivanja žele se zadovoljiti visoke razine eksploatacijskih karakteristika, kao i eliminacija problema poput štrcanja. Jedan od modificiranih postupaka je i CBT – Controlled Bridge Transfer koji predstavlja iskorak u razvoju MAG postupka. MAG CBT je modificirani način prijenosa metala koji kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. CBT tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline rezultira i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljina manjih od promjera dodatnog materijala [2].

2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE

2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

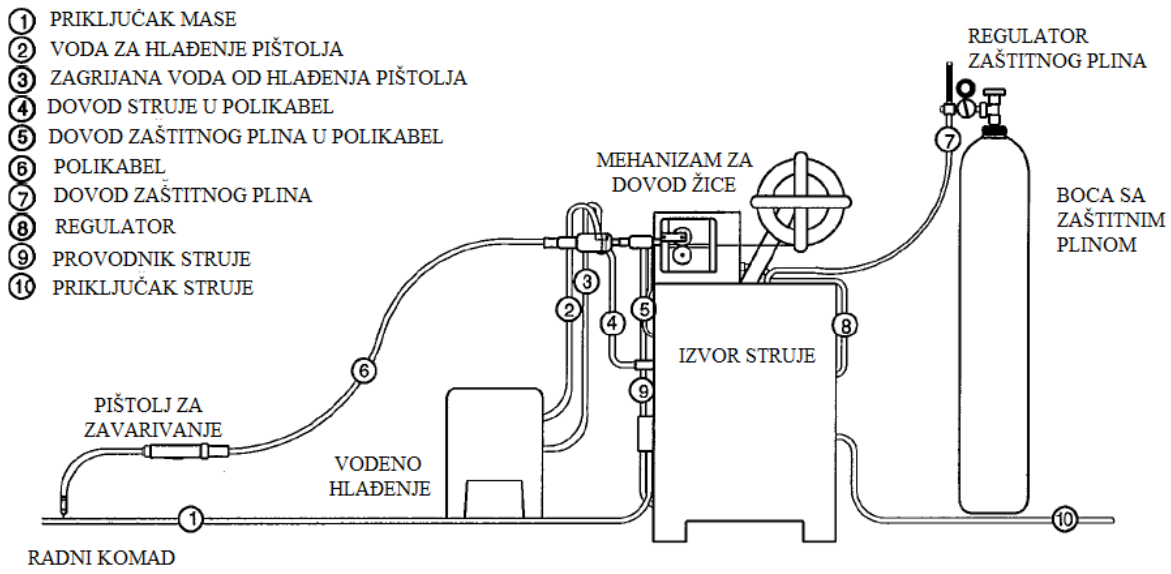
MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja koji kao izvor topline za taljenje osnovnog i dodatnog materijala koristi električni luk uspostavljen između metalne elektrodne žice i radnog komada. Cjelokupni proces se odvija u zaštiti aktivnog (CO_2 i mješavine) plina. Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni (+) pol istosmjernog izvora i radnog komada u zaštitnoj atmosferi plinova [3]. Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi odgovarajućeg zaštitnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku (boci), pod tlakom. Postupak MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran. Slika 1. prikazuje detalj MAG procesa zavarivanja.



Slika 1. Detalj MAG procesa zavarivanja [4]

Osnovnu opremu za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – eng. *Constant Voltage*), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina (Slika 2.). Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, koji je priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na

pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu, te sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se lako može mijenjati. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti) [4].



Slika 2. Oprema za MAG zavarivanje [4]

MAG postupak zavarivanja ima široku primjenu koja je omogućena brojnim prednostima od kojih su najvažnije [4]:

- Postupak je primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- Zavarivanje se može izvoditi u svim položajima,
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala,
- Zbog kontinuiranog dovođenja elektrode, moguće je proizvesti zavare većih duljina bez prekida,
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- Širok raspon debljina materijala koji se zavaruje,
- Velika učinkovitost i proizvodnost,
- Automatska regulacija visine električnog luka

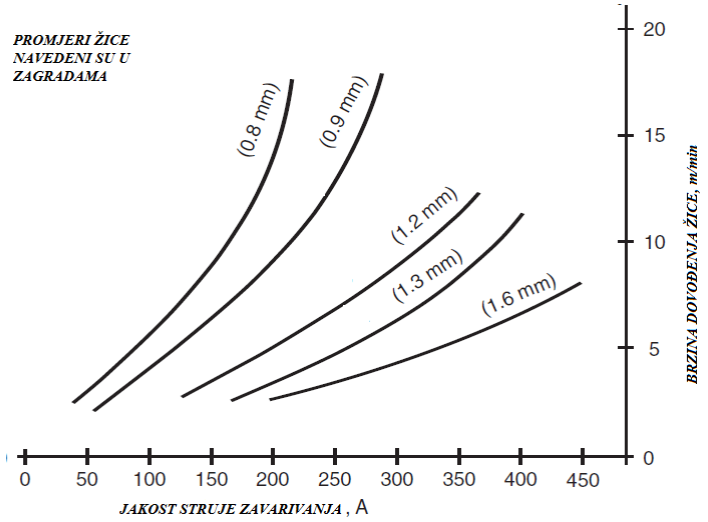
Zbog navedenih prednosti, MAG zavarivanje predstavlja dobar izbor kada je riječ o automatiziranim i robotiziranim proizvodnim procesima. Kao i svaki drugi proces zavarivanja, MAG postupak ima određene nedostatke [4]:

- Zbog oblika pištolja za zavarivanje, postoji određene poteškoće pri zavarivanju teško dostupnih zavarenih spojeva,
- Kod rada na terenu moguće su greške zbog loše zaštite mjesta zavarivanja (vjetar otpuhuje zaštitni plin),
- Mogući problemi kod dovođenja žice (zastoj žice u polikabelu),
- Štrcanje kod nekih vrsta prijenosa metala (kratki spojevi, prijelazni luk),
- Složeniji uređaji.

2.2. Parametri MAG postupka zavarivanja

Kako bi zavareni spojevi izvedeni MAG postupkom bili zadovoljavajuće kvalitete potrebno je podesiti parametre zavarivanja na odgovarajući način. Postoji dosta parametara zavarivanja, a oni koji u najvećoj mjeri utječu na kvalitetu zavarenog spoja su [5]:

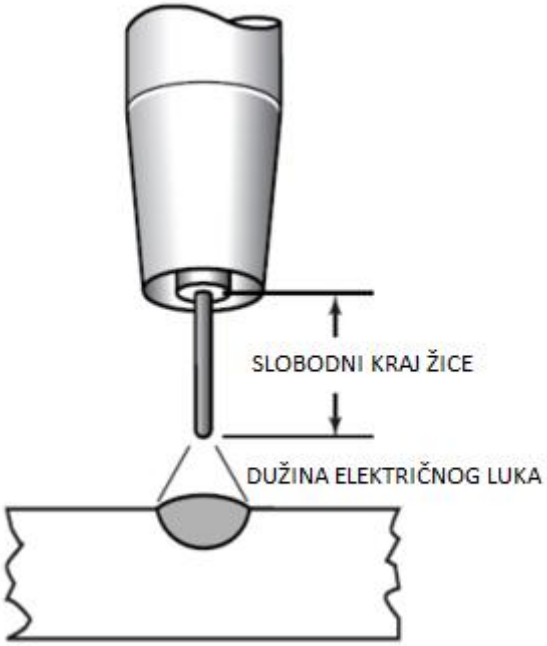
Jakost struje - jedan od najvažnijih parametara o kojem ovisi način na koji će se prenositi rastaljeni metal u električnom luku te stabilnost luka, penetracija, količina taline i brzina zavarivanja. Jakost struje direktno ovisi o promjeru žice, položaju zavarivanja i materijalu (debljini i vrsti). Različita je za različite načine prijenosa metala u električnom luku. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini dodavanja žice prikazana je slikom 3.



Slika 3. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini dodavanja žice [6]

Brzina zavarivanja - još jedan bitan faktor jer o njemu ovisi produktivnost postupka zavarivanja. Odabir brzine zavarivanja vrši se u korelaciji s položajem zavarivanja i jačini struje zavarivanja. Na slici 3. vidljiva je ovisnost brzine dodavanja žice o struji zavarivanja. Mijenjanjem brzine zavarivanja utječe se na izgled profila zavara kao i na mehanička svojstva istog. Povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži i penetracija manja dok smanjenjem brzine zavar postaje širi i penetracija bolja [7].

Slobodni kraj žice - dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka (slika 4.), odnosno dio žice koji je vidljiv zavarivaču. Promjena slobodnog kraja žice utječe na jakost struje u električnom luku. Povećanje slobodnog kraja žice dovodi do povećanja otpora struji te pada jakosti struje dok smanjenje slobodnog kraja žice dovodi do pada otpora protoku struje i do porasta jakosti struje. Zbog te promjenjivosti jakosti struje s povećanjem ili smanjenjem slobodnog kraja žice vrlo je važno slobodan kraj žice održati konstantnim da bi se održala konstantna vrijednost penetracije [6]. Neke karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice prikazani su u tablici 1.

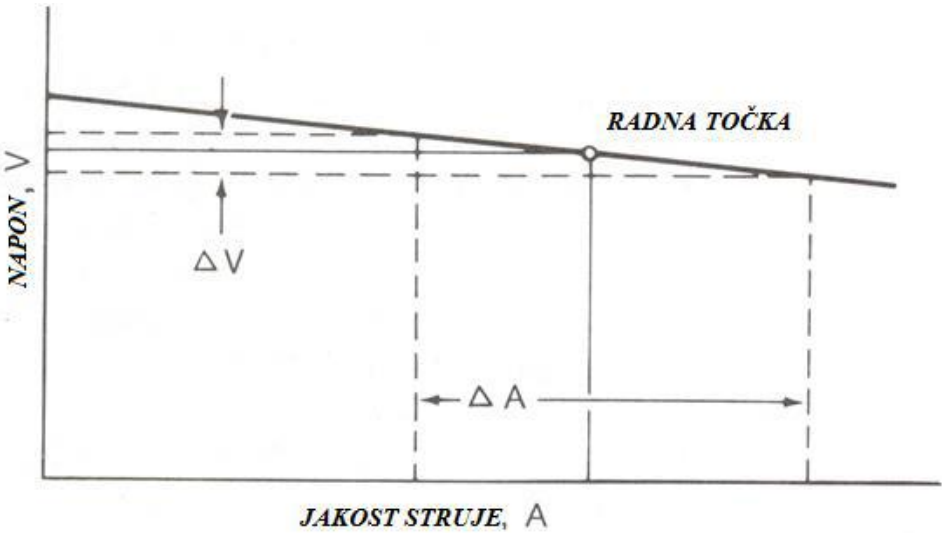


Slika 4. Slobodni kraj žice [6]

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice [7]

PROMJER ŽICE [mm]	JAKOST STRUJE [A]	SLOBODNI KRAJ ŽICE [mm]
0,6 - 0,8 mm	≤ 100 A	≤ 10 mm
0,9 - 1,2 mm	100 - 200 A	10 - 15 mm
1,2 - 1,4 mm	200 - 350 A	15 - 20 mm
1,4 - 1,6 mm	≥ 350 A	20 - 25 mm

Napon - uz jakost struje najvažniji parametar MAG zavarivanja. O njemu ovisi stabilnost električnog luka kao i njegova duljina i širina. Veza između napona i duljine električnog luka je proporcionalna. Za duži električni luk potreban je veći napon što dovodi do šireg zavara uz manju penetraciju. Iznos napona utječe na način prijenosa metala u električnom luka pa je za određene načine prijenosa on drugačiji [8]. Današnji uređaji za MAG zavarivanje su sinergijski izvori struje za zavarivanje koji prema definiranoj krivulji odabiru optimalnu kombinaciju jakosti struje i napona. Izvor koristi ravnu karakteristiku (Slika 5) za odabir optimalnih kombinacija parametara.



Slika 5. Karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje [8]

Veličina induktiviteta (uspona struje) - kontrola induktiviteta karakteristična je većini modernih izvora struje za MAG zavarivanje. Obično je ili fiksno podešen ili se može mijenjati. Ako je fiksno podešen znači da je optimalan nivo induktiviteta ugrađen u izvor struje za zavarivanje, a ukoliko ako ga je moguće mijenjati znači da se količina induktiviteta

primijenjenog na električni luk može podesiti. Induktivitet ima utjecaj samo za neke načine prijenosa metala u električnom luku (posebno kod prijenosa metala kratkim spojevima). Povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica u prijenosu kratkim spojevima i obratno [6].

Protok i vrsta zaštitnog plina - zaštitni plin osigurava područje zavara od reakcije s plinovima iz atmosfere te ima velik utjecaj na oblik profila zavara tj. širinu i penetraciju, brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Protok plina namješta se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete zavarivanja i karakteristike spoja koji želimo zavariti. Veća jakost struje zavarivanja zahtijeva i veći protok zaštitnog plina jer ako protok nije dovoljno velik mogu se javiti greške u zavarenom spoju.

2.3. Prijenos metala u električnom luku

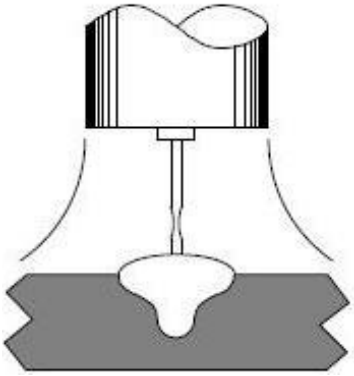
Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom rastaljeni se metal s elektrodne žice prenosi u obliku kapljica koje se mogu prenositi premošćivanjem ili slobodnim letom. Prijenos metala premošćivanjem obuhvaća prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom dok se slobodnim letom kapljice mogu prenositi štrcajućim ili impulsnim lukom [3]. Prijenos metala kratkim spojevima, mješovitim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose, dok impulsni prijenos kapljica spada u kontrolirani prijenos metala.

Kod MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer je odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajuću vrstu prijenosa metala koja za odabranu primjenu predstavlja optimalan odabir. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja. Prijenos metala kod MAG zavarivanja ovisi o tipu dodatnog materijala, naponu, jakosti struje, polaritetu elektrode, slobodnom kraju žice te o zaštitnom plinu [1].

2.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima

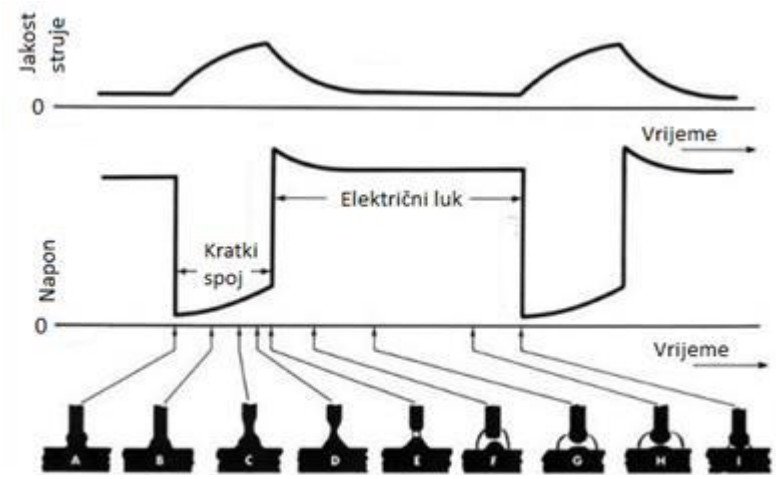
Prijenos metala kratkim spojevima (eng. Short Arc, oznaka MAGk) je način prijenosa metala kada žica za vrijeme kratkog spoja dodiruje talinu zavara i to se ponavlja periodički.

Kod prijenosa kratkim spojevima koriste se male struje zavarivanja (od 50 do 170 A), niski naponi (od 13 do 21 V) i elektrodne žice malih promjera (od 0,6 do 1,2 mm), zaštitni plin CO_2 ili mješavine (CO_2 + Ar, CO_2 + Ar + O_2) [9]. Na slici 6. je prikazan prijenos metala koji se javlja kad se uspostavi kratki spoj između žice i taline, odnosno radnog komada.



Slika 6. Prijenos metala kratkim spojem [10]

Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće kapljicu taline i vrška žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja (Slika 7) [4].



Slika 7. Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [11]

Slika 7 prikazuje princip prijenosa metala kratkim spojevima u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i naponu po fazama (A – I). Opis faza je sljedeći:

A – stanje kada žičana elektroda dotakne radni komad, u električnom krugu nastane kratki spoj. U tom trenutku napon pada na nulu, struja počinje eksponencijalno rasti (brzina rasta je ograničena induktivnim otporima kruga),

B, C, D – napon polako raste zbog povećanja otpora do kojeg dolazi jer povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice (efekt $Q = I^2 \cdot R$ sve do taljenja) i povećava se „pinch – efekt“ koji dovodi do smanjenja presjeka žice (povećani otpor) i otkidanja zagrijanog vrha žice,

E – prekida se kratki spoj i uspostavlja se opet električni luk, a struja počinje eksponencionalno padati na nominalnu vrijednost,

F, G, H – skok napona je opet nešto veći od nominalnog zbog induktiviteta krugova i s vremenom se smanjuje na nominalnu vrijednost (G,H),

I – trenutak neposredno prije nego žica dotakne radni komad i ponovno dođe do kratkog spoja nakon čega se cijeli proces opet ponavlja.

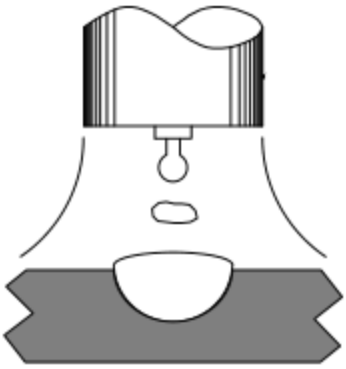
Sve ove faze se zbivaju dok se žičana elektroda jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica premosti razmak nastao otkidanjem vrha, ponavlja se ciklus od faze A. Broj ciklusa po sekundi varira u ovisnosti o promjeru žice i pri stabilnim parametrima ima 100 ÷ 200 kratkih spojeva u sekundi. Mali unos topline omogućuje kratkim spojevima svestranu primjenu, od tankih do debelih materijala te zavarivanja u svim položajima. Izrazito je pogodan za zavarivanje korijena kod zavarivanja cjevovoda te kod zavarivanja tankih limova u svim položajima. Kratki spojevi se primjenjuju kod zavarivanja gdje je zahtijevana minimalna deformacija radnog komada. Prijenos kratkim spojevima se lako zvučno prepozna po karakterističnom pucketanju ako se radi s pravilnim parametrima. Glavni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učinak taljenja, ali i velika vjerojatnost pojave naljepljivanja [4].

2.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom (eng. mixed arc, oznaka MAGi) je kombinacija štrcajućeg luka i u manjoj mjeri dolazi do pojave kratkih spojeva. Odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkog spoja.

Za postizanje prijenosa metala prijelaznim lukom prikladne su veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i naponi (od 22 V do 25 V), ovisno o promjeru žice. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Posljedica toga je više prskanja, neregularnost prijenosa (pojava kratkih spojeva je slučajna i izaziva nepredvidivo štrcanje materijala), teško se kontrolira, položaj zavarivanja je ograničen na horizontalne položaje, lošije je kvašenje taline, što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem. Zbog svih nabrojanih nedostataka prijenos metala prijelaznim lukom se izbjegava te se pokušava minimalizirati u praksi [4].

Na slici 8. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom gdje je vidljivo da je promjer kapljice veći od promjera žice.



Slika 8. Prijenos metala prijelaznim lukom [10]

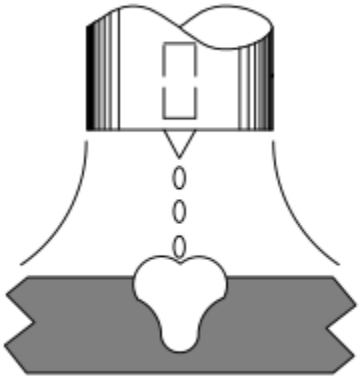
2.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom (eng. spray arc, oznaka MAGs) karakterizira prijenos puno malih kapljica koji se vrši slobodnim letom kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (radijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Koristi se relativno visok napon od 24 do 40 V te struja od 200 do 600 A [8]. Broj kapljica metala otkinutih u sekundi može biti i više od nekoliko stotina. Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu, pa se primjenjuje

kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona.

Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su veliki depozit, velika penetracija, lijep izgled, mogućnost korištenja većih promjera žice te malo nepoželjnog prskanja. Nedostatci ovakvog prijenosa su opasnost od progaranja kod tanjih materijala (koristi se kod materijala od 3 mm i debljih) i opasnost od slijevanja velike količine rastaljenog materijala u prisilnim položajima zbog djelovanja gravitacijske sile [4].

Na slici 9. je prikazan pojednostavljeni shematski prikaz prijenos metala štrcajućim lukom gdje je promjer kapljice manji od promjera žice.



Slika 9. Prijenos metala štrcajućim lukom [10]

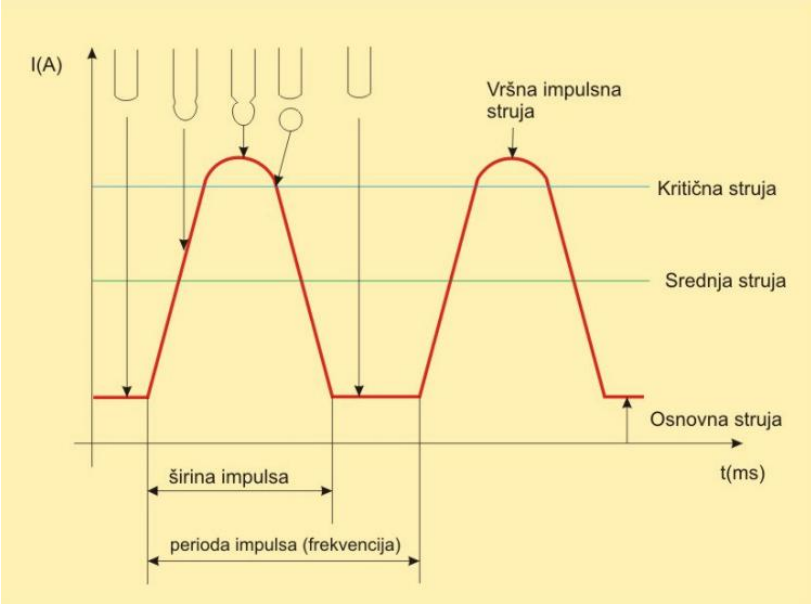
2.3.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom (eng. pulsed arc, oznaka MAGp) je po mehanizmu prijenosa kapljica u talinu sličan prijenosu štrcajućim lukom. Kod oba prijenosa metal se prenosi slobodnim letom kapljica, bez kratkih spojeva. Kod prijenosa metala impulsnim lukom izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa (frekvencijom od 20 – 300 Hz) [13].

Impulsnim načinom se osigurava stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Daljnje mogućnosti razvoja postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori, kojima je moguće stvarati impulse proizvoljnog oblika što znači utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice [13]. U praksi se kod zavarivanja

uobičajeno koriste sinusoidni oblik, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja.

Prosječna struja zavarivanja kod impulsnog zavarivanja manja je od kritične struje koja uzrokuje nepravilan i neprihvatljiv prijenos metala u grubim kapima. Jakost struje zavarivanja određuje se tako da varira između minimalne (osnovna struja impulsa) i maksimalne struje (vršna struja impulsa). Osnovna struja održava električni luk, dok je duljina trajanja i visina impulsa vršne struje prilagođena da premaši kritičnu struju i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu [4]. Slika 10 prikazuje promjenu jakosti struje o vremenu i način otkidanja kapljice.



Slika 10. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [13]

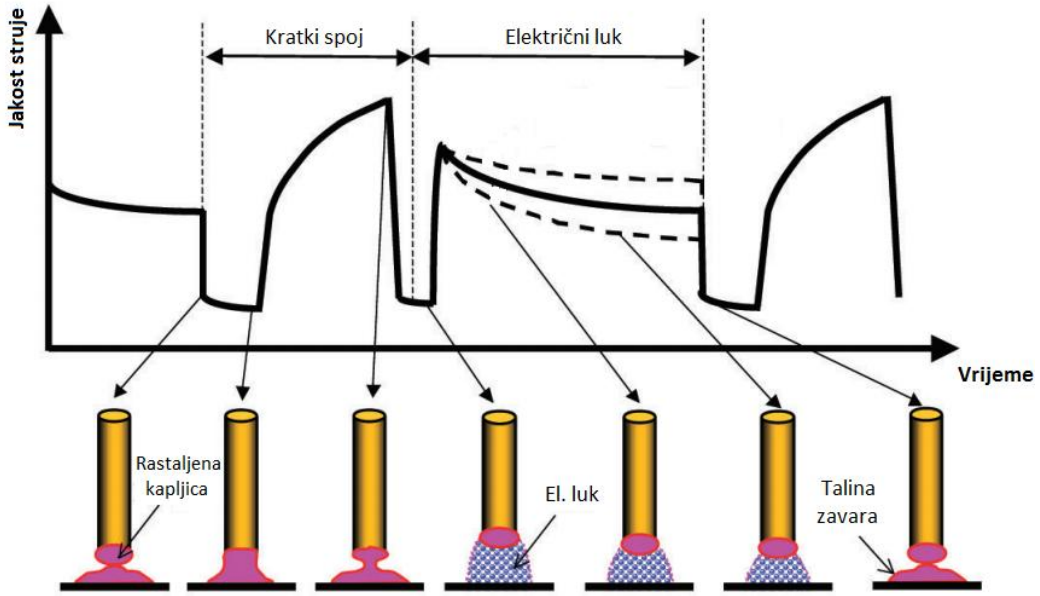
Postoji pet osnovnih parametara koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnog zavarivanja [13]:

- Vršna impulsna struja koja se kreće u granicama 250 – 650 A,
- Osnovna struja služi da onemogući gašenje luka nakon prestanka impulsa, a kreće se u granicama 20 – 50 A,
- Širina impulsa koja se kreće u granicama 1 – 3 ms,
- Frekvencija je parametar koji određuje broj kapljica u sekundi,
- Brzina dodavanja žice.

Zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala zadržava prednosti, a ujedno i otklanja poteškoće koje se javljaju kod štrcajućeg luka tako da se može primijeniti u svim položajima, te za materijale koji su osjetljivi na količinu unosa topline. Također je primjenjiv u cjelokupnom rasponu od niskih do visokih struja zavarivanja.

3. CONTROLLED BRIDGE TRANSFER (CBT)

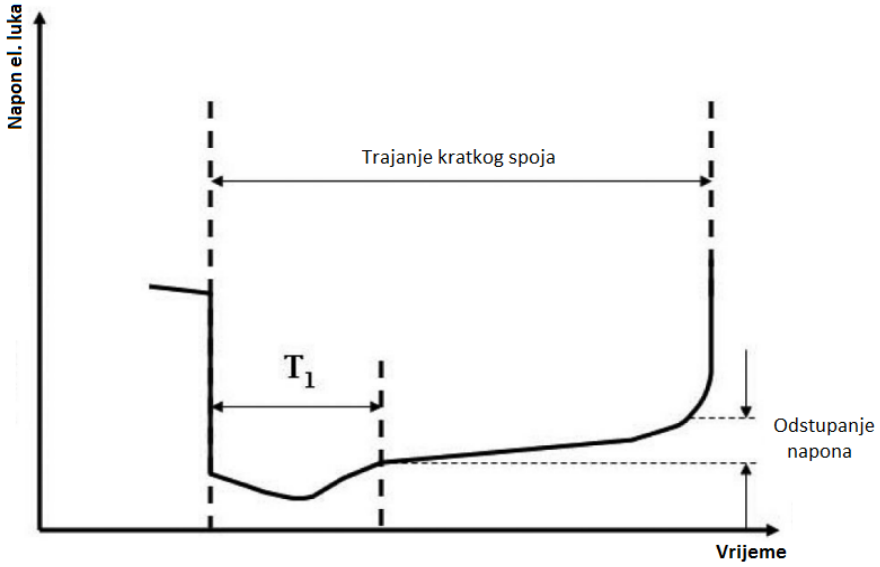
MAG postupak prikladan je za zavarivanje tankih limova, ali je u području minimalnog unosa topline tj. kratkom luku osjetljiv na štrcanje rastaljenih kapljica koje nastaju kao posljedica nestabilnog procesa. Potrebno je naglasiti da prvenstveno automobilska industrija gdje se primjenjuju tanki limovi kontinuirano zahtijeva od proizvođača opreme za zavarivanje razvoj u smjeru produktivnosti, ali i smanjenja naknadne obrade kako bi se smanjila količina industrijskog otpada i dodatni troškovi nastalih uklanjanjem posljedica štrcanja. Kao trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine štrcanja, koristi se impulsno MAG zavarivanje, ali se bilježi i porast korištenja modificiranih MAG postupaka zavarivanja. Konvencionalno MAG zavarivanje kratkim spojevima, pomoću kojeg je moguće smanjiti unos topline u radni komad, koristi se kako bi se eliminiralo protaljivanje tanjih radnih komada. No, pri korištenju konvencionalnog MAG postupka zavarivanja dolazi do veće količine štrcanja i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka odmah nakon prekida kratkog spoja. Svi navedeni problemi rezultirali su razvojem novog načina prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i konvencionalnog MAG zavarivanja – CBT, Controlled Bridge Transfer metoda [2].



Slika 11. Princip CBT MAG postupka zavarivanja [14]

Kritični trenutak gdje se pojavljuje štrcanje pri MAG zavarivanju kratkim spojevima je odmah nakon prekida kratkog spoja, odnosno u trenutku ponovne uspostave električnog luka. Kako bi se smanjila pojava štrcanja kada na rastaljeni metal djeluje sila „pinch efekta“, potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. U istom trenutku, u skladu s padom napona, dolazi i do pada vrijednosti jakosti struje (slika 11). Kao posljedica pada jakosti struje prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši se isključivo pomoću površinske napetosti. Trenutak u kojem se odvija odvajanje kapljice može zbog utjecaja različitih čimbenika (duljina slobodnog kraja žice, brzina zavarivanja, položaj zavarivanja, veličina i oblik rastaljene kapljice metala, ponašanje taline) varirati. Kako bi se izbjegao utjecaj navedenih čimbenika, jakost struje zavarivanja podešava se optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka. Na taj način moguće je upravljati prijenosom metala za vrijeme kratkog spoja i stabilizirati električni luk [2].

Na slici 12 prikazan je princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja. Usporedivši slike 11 i 12 vidljivo je da nakon pojave kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti s padom jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava štrcanja. Period kratkog spoja u kojem napon još nije počeo rasti označen je s T_1 i napon u tom području se smatra referentnim naponom. Daljnje odstupanje od referentnog napona učestalo se mjeri te kada odstupanje dosegne definiranu graničnu vrijednost, dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka.



Slika 12. Predviđanje trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka [14]

Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80 % Ar + 20 % CO_2 optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1,2 V do 2,0 V. Preciznim predviđanjem uspostave električnog luka i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnog luka, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti i štrcanje se uspijeva kontrolirati [14].

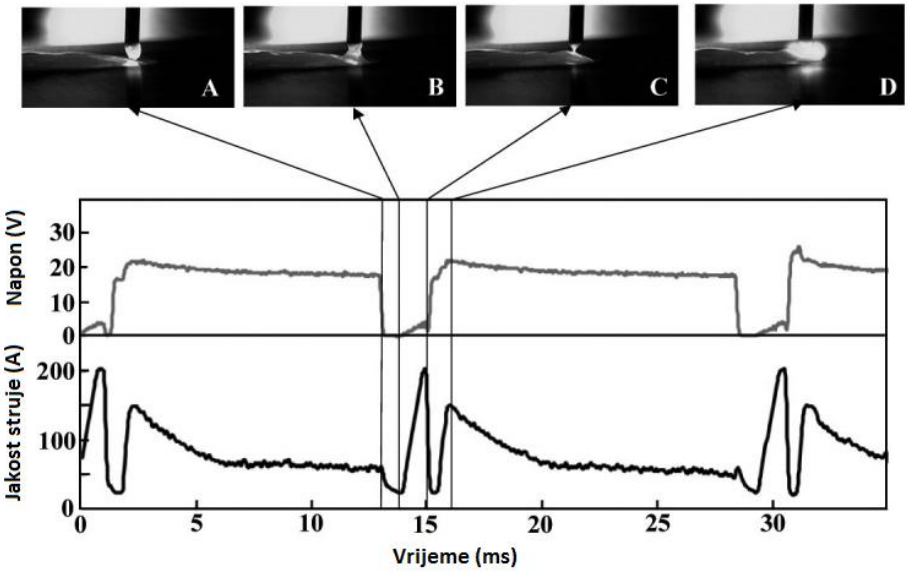
Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline rezultira i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljina manjih od promjera dodatnog materijala [2].

Prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri CBT načinu prijenosa metala snimljen visokobrzinskom kamerom prikazan je na slici 13. Prijenos rastaljene kapljice je snimljen u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Parametri korišteni pri snimanom MAG CBT zavarivanju navedeni su u tablici 2.

Tablica 2. Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [15]

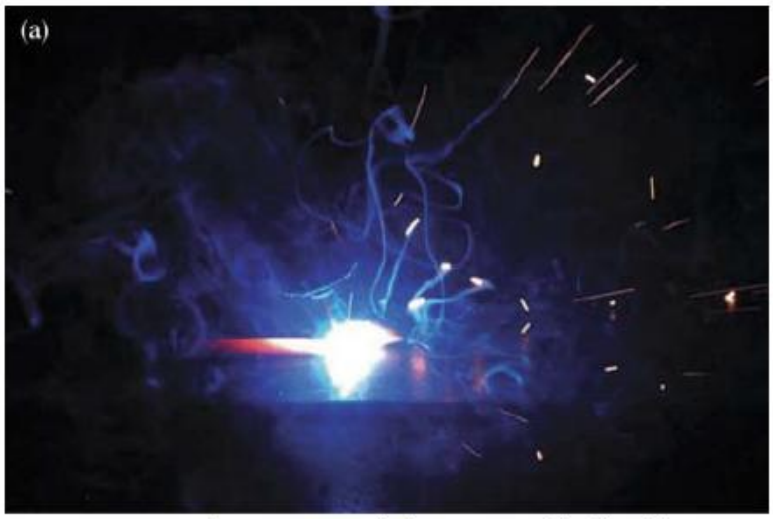
Zaštitni plin	80 % Ar + 20 % CO2
Jakost struje [A]	80
Napon [V]	16,2
Promjer žice [mm]	1,0
Brzina zavarivanja [cm/min]	50

Kadar A na slici 13 prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkog spoja. Prolaskom vremena na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavara, te njen stisnuti oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, kadar D, ne dolazi do pojave štrcanja.

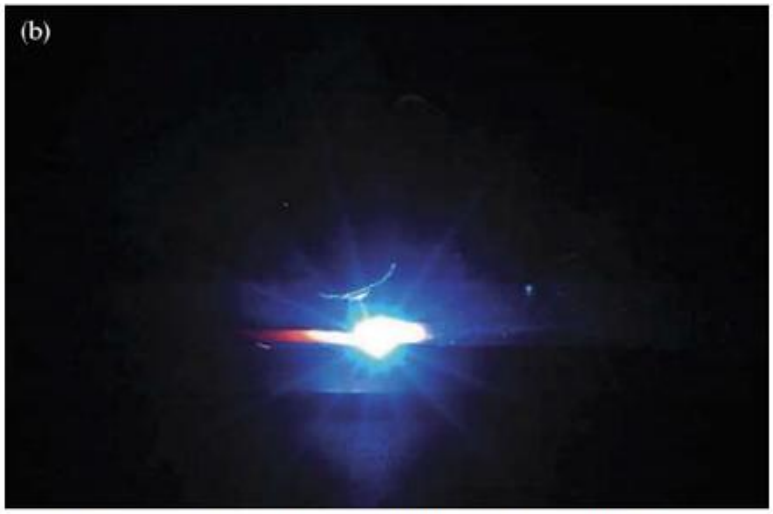


Slika 13. Faze CBT prijenos metala u realnom vremenu snimljene visokobrzinskom kamerom [14]

Slika 14.a prikazuje slučaj zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja gdje nije bilo preciznog predviđanja pojave električnog luka. Pošto je predviđanje pojave električnog luka bilo namješteno na duljinu slobodnog kraja žice od 5 mm, s povećanjem duljine slobodnog kraja žice sve više su rasle krive detekcije ponovnog uspostavljanja električnog luka, a s time je rasla i veća količina štrcanja. Zbog lažnih detekcija uspostavljanja električnog luka, struja kratkog spoja bila je neadekvatna što je dovelo do neuravnoteženog taljenja žice u kratkom spoju i nestabilnog električnog luka. Slika 14.b prikazuje slučaj zavarivanja pomoću CBT metode prijenosa metala. Preciznim predviđanjem pojave električnog luka i kontroliranjem struje zavarivanja smanjilo se štrcanje [15].



Zavarivanje bez preciznog predviđanja pojave električnog luka



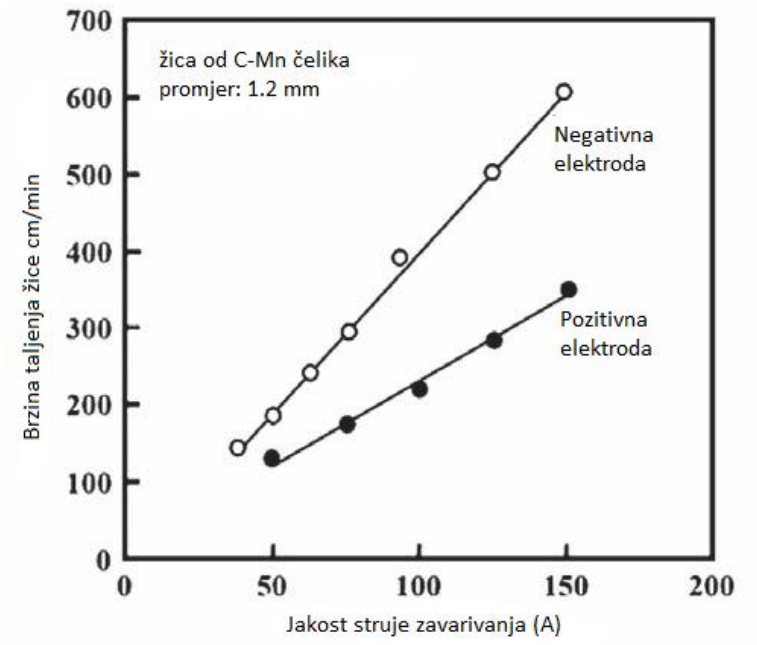
Zavarivanje sa preciznim predviđanjem pojave električnog luka

Slika 14. Usporedba zavarivanja konvencionalnim MAG i CBT MAG [15]

3.1. EN-CBT postupak

CBT način prijenosa metala se može koristiti i kod zavarivanja sa žicom spojenom na negativni pol (Electrode Negative; u daljnjem tekstu EN-CBT) što omogućuje smanjeno štrcanje i mali unos topline. Pri EN-CBT postupku količina topline u žici je veća nego u osnovnom metalu. Zbog toga je brzina taljenja žice (depozit) pri EN-CBT veća nego kod CBT postupka sa žicom spojenom na pozitivan pol. Na slici 15 se može vidjeti usporedba brzine taljenja žice promjera 1,2 mm kada je spojena na pozitivan pol i kada je spojena na negativan pol u zaštitnoj atmosferi 100 % CO_2. Kod zavarivanja s EN-CBT postupkom vrijednost struje zavarivanja je 2/3 vrijednosti struje kod zavarivanja s pozitivnom elektrodom

pri jednakoj količini depozita. Ili drugim riječima, EN-CBT omogućuje manji unos topline, pri jednakoj količini depozita, nego kod zavarivanja s elektrodom spojenom na pozitivan pol [15].



Slika 15. Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu [15]

3.2. AC – CBT postupak

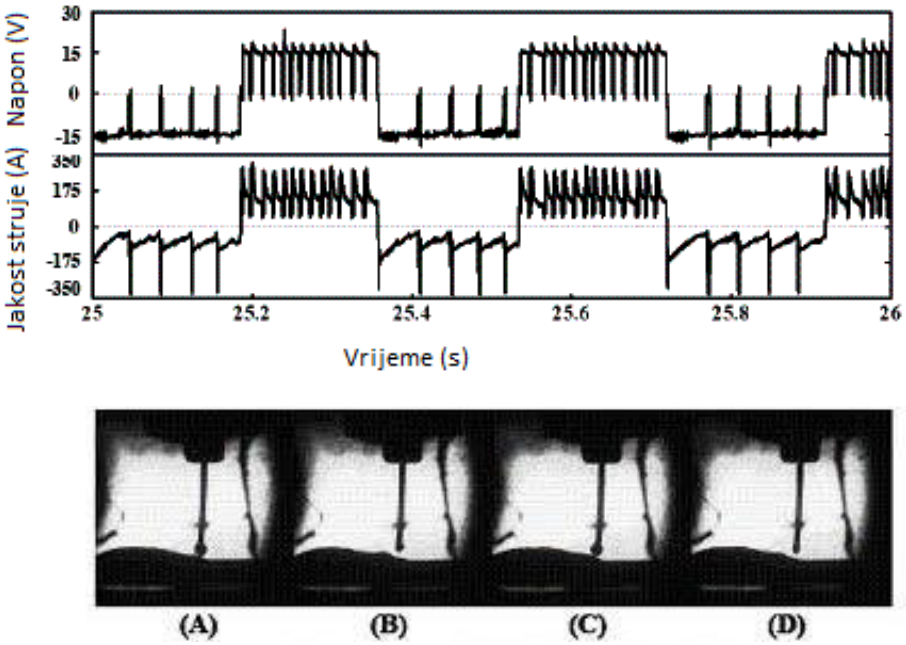
AC – CBT (Alternative Current – CBT) postupak je varijanta konvencionalnog CBT postupka gdje se koristi izmjenična struja s malom frekvencijom izmjene pozitivnog i negativnog pola. Vrijeme trajanja pozitivnog i negativnog pola se mjeri pomoću frekvencije i omjera pozitivnog i negativnog pola. Iako je brzina taljenja žice za vrijeme negativnog polariteta otprilike 1,5 puta veća nego kod pozitivnog, može se postići stabilan prijenos metala za vrijeme oba polariteta. Ta stabilnost se prvenstveno postiže pomoću novo razvijenih uređaja i mikroprocesora koji omogućuju preciznu kontrolu karakteristika električnog luka (jakost struje, napon) za vrijeme trajanja oba polariteta [16].

Slika 16 prikazuje prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri AC-CBT načinu prijenosa metala snimljen visokobrzinskom kamerom s mogućnošću snimanja 6000 slika u sekundi. Prijenos rastaljene kapljice je snimljen u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Parametri korišteni pri zavarivanju su navedeni u tablici 3.

Tablica 3. Parametri zavarivanja AC-CBT postupkom [16]

Zaštitni plin	80 % Ar + 20 % CO_2
Jakost struje [A]	100
Napon [V]	15,0
Promjer žice [mm]	1,2
Brzina zavarivanja [cm/min]	50
Frekvencija [Hz]	3,0
Omjer + i - pola [%]	50

Kadar A na slici 16 prikazuje trenutak prijenosa metala u vrijeme mjerenja ekvivalentan trenutku mjerenja jakosti struje i napona od 25 sekundi. U tom trenutku električni luk je u drugoj polovici pri negativnim polaritetom. Kadar B prikazuje rastaljenu kapljicu u trenutku ponovnog uspostavljanja električnog luka nakon prolaska kratkog spoja. Kadar C prikazuje trenutak od 25,2 sekunde neposredno prije prelaska polariteta iz negativnog u pozitivan. Vidljivo je da rastaljena kapljica ima gotovo identičan oblik i veličinu kao u kadru A. Na kadru C se vidi da je štrcanje spriječeno i kod ponovne uspostave električnog luka neposredno nakon promjene polariteta [16].

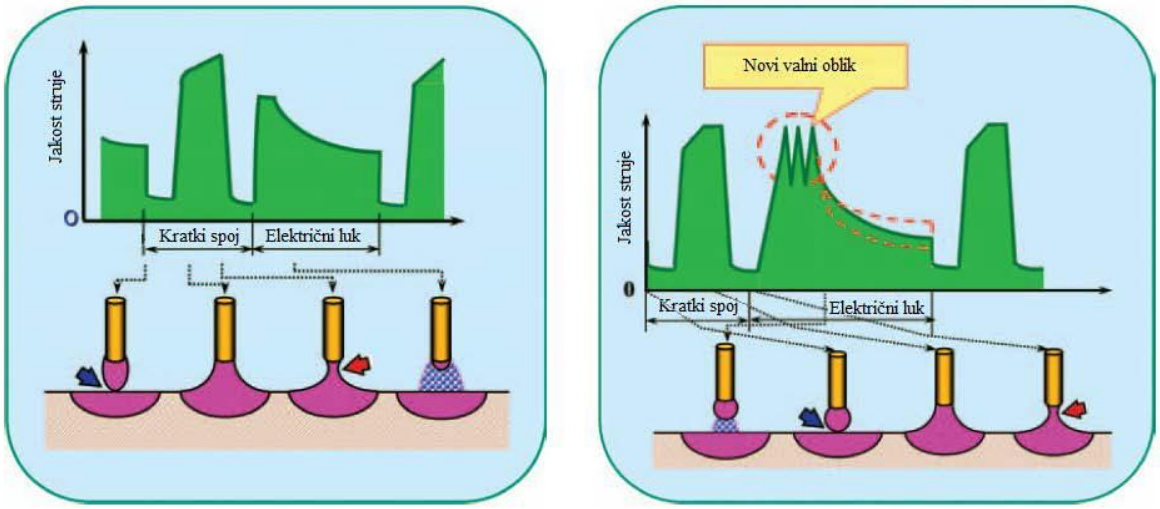


Slika 16. Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [16]

Prednost ovog postupka je smanjivanje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Kao rezultat toga, uz preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal ostvareno je i jednostavno kontroliranje oblika zavara. Isto tako se smanjila pojava štrcanja do 6 puta s obzirom na klasični AC – MAG [16].

3.3. CBT-EX postupak

Konvencionalnim CBT načinom prijenosa metala moguće je smanjiti pojavu štrcanja samo u rasponu parametara koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. Pojačavanjem parametara dolazi se do krupnokapljičastog (globularnog) prijenosa metala koji se koristi kako bi se povećala proizvodnost procesa i brzina zavarivanja. U tom rasponu parametara više nije moguće koristiti konvencionalni CBT postupak zavarivanja već ga je potrebno nadograditi, odnosno primijeniti novu inačicu: eng. *Controlled Bridge Transfer – Expanded*, CBT – EX. Slika 17 prikazuje princip rada CBT – EX MAG postupka zavarivanja. Smanjenje pojave štrcanja prije ponovne uspostave električnog luka slična je kao i u slučaju CBT MAG postupka zavarivanja. No, da bi se u krupnokapljičastom prijenosu predvidjela ponovna uspostava električnog luka, razvijen je novi visokoprecizni i visokobrzinski Welbee mikroprocesor. Osim predviđanja uspostave električnog luka pomoću ovog mikroprocesora moguće je formirati rastaljenu kapljicu metala odgovarajućih dimenzija i oblika na samom vrhu elektrode i to pomoću fine regulacije duljine električnog luka [2].



a) Općeniti valni oblik struje za MAG zavarivanje

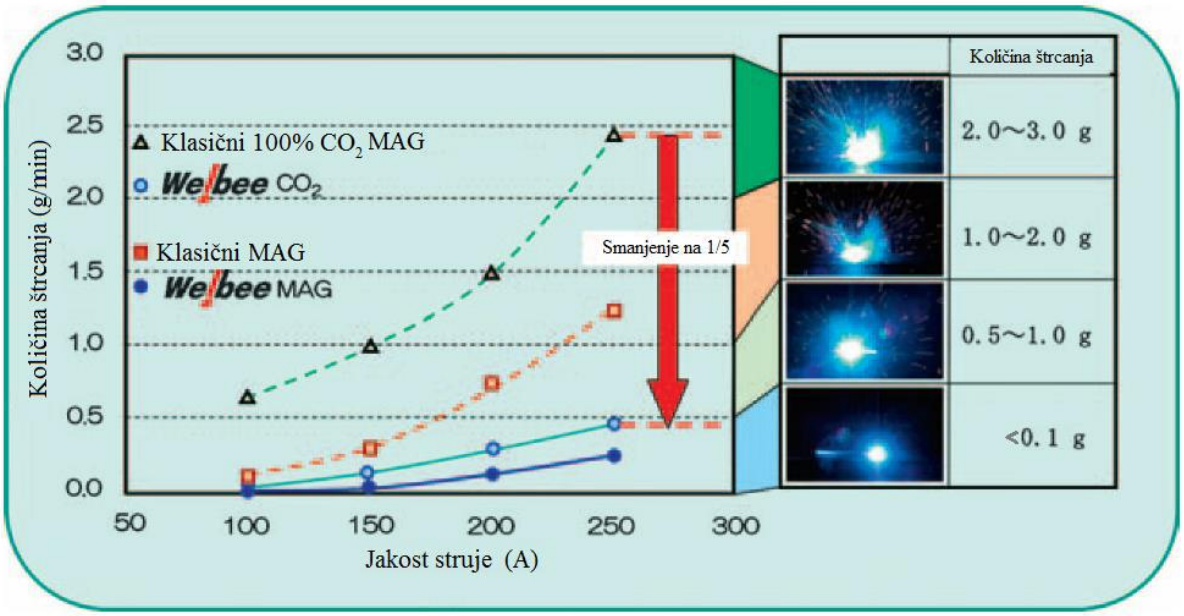
b) Valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO_2 zaštiti

Slika 17. Princip CBT-EX tehnologije MIG/MAG zavarivanja [2]

Na slici 17.a prikazan je općeniti valni oblik struje za MAG zavarivanje. Vidljivo je da u trenutku prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učina taljenja dodatnog materijala s obzirom na to da je kod krupnokapljičastog prijenosa metala brzina dodavanja žice veća nego što je to u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima. Kako bi se nadoknadio gubitak energije, zbog smanjenja jakosti struje kratkog spoja, i na taj način se postigla odgovarajuća veličina rastaljene kapljice metala, u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Nakon toga, jakost struje koja se mijenja u realnom vremenu ovisno o metodi prijenosa metala i ponašanju taline, regulira duljinu električnog luka. Novorazvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju što omogućava manji unos topline i veće brzine zavarivanja pa se stoga može primjenjivati kod zavarivanja korijena sučeljenog spoja cijevi [2].

Na slici 17.b je prikazan valni oblik struje pri zavarivanju u 100 % CO_2 zaštiti. Uzrok štrcanju pri krupnokapljičastom prijenosu metala su eksplozije plina u talini i/ili rastaljenoj kapljici zbog pregrijavanja visokom strujom zavarivanja. Zbog karakteristične primjene CBT-EX tehnologije zavarivanja (zavarivanje velikim brzinama), potrebno je održavati kratki električni luk. Kratki električni luk može uzrokovati povremenu pojavu kratkih spojeva što dovodi do hlađenja metala zavara. Štrcanje pored navedenih pojava može uzrokovati i djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu zbog disocijacije ugljičnog dioksida (CO_2) na ugljični monoksid (CO) i kisik (O_2). Da bi se spriječilo i izbjeglo djelovanje odbojne sile na kapljicu izvršena je promjena u valnom obliku struje. Promjena se očituje u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka (Slika 17.b). Na takav način se postiže stabilan prijenos metala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju krupnokapljičasti prijenos metala [2].

Slika 18 prikazuje usporedne rezultate pojave štrcanja pri variranju jakosti struje (od 100 A do 250 A) i tehnologije zavarivanja (konvencionalni MAG i CBT – EX MAG). Korišten je dodatni materijal promjera 1,2 mm, a brzina zavarivanja iznosila je 100 cm/min. Najveća razlika u količini štrcanja primijećena je kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2. U navedenom slučaju je pri CBT – EX MAG zavarivanja postignuto smanjenje štrcanja na 20 % (0,5 g/min) od ukupne količine štrcanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja (2,5 g/min). Kod MAG – M zavarivanja postignuta je minimalna količina štrcanja od 0,25 g/min.



Slika 18. Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT – EX MAG i konvencionalnom MAG zavarivanju [2]

3.4. Izvor struje za CBT postupak zavarivanja

U novije vrijeme sve više se koriste inverterski ispravljači koji su znatno lakši i pogodniji za upotrebu od ostalih izvora struje za zavarivanje. Dodatna prednost invertera je njihova povećana efikasnost jer su gubici u željeznoj jezgri transformatora manji u odnosu na konvencionalne transformatore pa je stupanj iskorištenja invertera veći od svih ostalih izvora zavarivanja. U tablici 4 klasificirane su četiri generacije digitalnih invertera te su prikazane njihove osnovne karakteristike [4].

Tablica 4. Klasifikacija digitalnih invertera [17]

	Prva generacija 1996 - 2000	Druga generacija 2001 -	Treća generacija 2008 -	Četvrta generacija 2010 -
Uređaj za zavarivanje				
Procesor	16- bit CPU	32- bit CPU	FPGA	ASIC
Vrijeme obrade podataka	100 µs	25 µs	1µs	20 ns
Kapacitet procesora	1	4	16	64

Prva generacija koja je razvijena 1996. godine koristi 16-bitni procesor s vremenom obrade podataka od 100 µs. Radi usporedbe s ostalim generacijama snaga procesora prve generacije označena je s 1. Druga generacija invertera razvijena je između 2001. i 2007. godine te su bili korišteni 32-bitni procesori s vremenom obrade podataka od 25 µs i snagom povećanom četiri puta. Treća generacija, koja je poveznica do četvrte generacije, razvijena je 2008. godine i ima vrijeme obrade podataka manje od 1µs i snagu procesora označenu sa 16. Novorazvijeni visokobrzinski Welbee mikroprocesor pripada zadnjoj, četvrtoj generaciji invertera, a razvijen je 2010 godine. Brzina obrade podataka kod Welbee mikroprocesora je oko 20 ns i snaga procesora je povećana na 64 puta u odnosu na prvu generaciju. Velika brzina obrade podataka omogućuje Welbee mikroprocesoru visokobrzinsku i visokopreciznu kontrolu dinamičke karakteristike jakosti struje i napona izvora struje [17].

4. ZAŠTITNI PLINOVI KOD MAG ZAVARIVANJA

4.1. Općenito o zaštitnim plinovima kod MAG zavarivanja

Primarna funkcija zaštitnog plina kod MAG zavarivanja je stvoriti zaštitu oko zavarenog spoja na način da se izolira od okolišne atmosfere kako ne bi došlo do kontaminacije metala zavara. To je nužno jer većina metala zagrijavanjem na zraku razvije veliki afinitet prema stvaranju oksida i u manjoj mjeri nitrida. Tako dolazi i do reakcije kisika s ugljikom iz taline koji zajedno tvore ugljični monoksid i ugljični dioksid što može rezultirati nepravilnostima u metalu zavara kao npr. uključci troske, poroznost i povećana krhkost. Osim što služi kao zaštitna atmosfera, zaštitni plin svojim djelovanjem utječe i na karakteristiku električnog luka, način prijenosa metala, profil zavara/navara, brzinu zavarivanja, pojavu ugorina, čišćenje površine i svojstva metala zavara [4].

Plinovi koji se koriste pri MAG zavarivanju su ugljični dioksid (CO_2) te dvokomponentne i trokomponentne mješavine argona (Ar), ugljičnog dioksida (CO_2), kisika (O_2) i helija (He) dok je moguća pojava vodika (H_2) i dušika (N_2) u manjim postotcima [8].

Razumijevanjem osnovnih fizikalnih i kemijskih svojstava zaštitnog plina omogućava se pravilan odabir zaštitnog plina ili mješavine plinova za određenu primjenu. Ukoliko se odabere najbolja opcija za zaštitni plin moguće je ostvariti visokokvalitetne zavarene spojeve kao i značajne uštede u cjelokupnoj izradi konstrukcije. Najvažnija fizikalna svojstva plinova koja imaju utjecaj na proces zavarivanja su: gustoća plina, energija disocijacije, ionizacijski potencijal, sposobnost otapanja u metalu i toplinska vodljivost [4]. Vrijednosti najvažnijih fizikalnih svojstava argona, ugljičnog dioksida i kisika dane su u tablici 5.

Tablica 5. Vrijednosti najvažnijih fizikalnih svojstava argona, ugljikovog dioksida i kisika [18]

PLIN	Kemijski simbol	Gustoća kg/m^3	Energija disocijacije eV	Ionizacijski potencijal eV	Toplinska vodljivost W/(mK)
Argon	Ar	1,784	-	15,8	0,02573
Ugljični dioksid	CO_2	1,977	5,3	14,4	0,03293
Kisik	O_2	1,429	5,1	12,6	0,02630

Gustoća plina ima veliki utjecaj na njegovu učinkovitost. Plinovi veće gustoće od gustoće zraka kao što su argon i ugljični dioksid za jednaku zaštitu zahtijevaju manji dotok od plinova manje gustoće od gustoće zraka kao što je npr. helij [18].

Energija disocijacije je ona količina energije koju je potrebno dovesti dvo ili višeatomnoj molekuli plina da dođe do disocijacije tj. do odvajanja jednog atoma. Prilikom zavarivanja u električnom luku razvijaju se vrlo visoke temperature (oko 10 000 °C) na kojima dolazi do razlaganja tj. disocijacije molekularnih zaštitnih plinova na atome. Atomi su nakon toga djelomično ionizirani što poboljšava električnu vodljivost zaštitne atmosfere. U trenutku kontakta toplog disociranog plina i hladne površine radnog komada, dolazi do rekombinacije odnosno ponovnog sklapanja atoma u molekule što rezultira oslobađanjem velike količine energije [4]. U slučaju korištenja argona i helija kao zaštitnih plinova nema rekombinacije obzirom da su argon i helij već u atomarnom stanju zbog čega ne može doći do disocijacije. Iz toga proizlazi da će pri jednakoj temperaturi električnog luka, generirana toplina na radnoj površini biti veća pri upotrebi ugljičnog dioksida, kisika i vodika kao zaštitnih plinova nego kod argona i helija [18].

Ionizacijski potencijal plina predstavlja energiju, izraženu u elektronvoltima, potrebnu za ionizaciju plina. Pri konstantnim parametrima plina manji ionizacijski potencijal imaju plinovi s većom molekulskom tj. atomskom masom plina. Uspostava i održavanje električnog luka uvelike ovisi o ionizacijskom potencijalu zaštitnog plina. Zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala olakšavaju uspostavu električnog luka i povećavaju stabilnost tijekom rada [18].

Toplinska vodljivost plina definira njegovu sposobnost da provodi toplinu, odnosno u kolikoj mjeri dolazi do rasipanja topline udaljavanjem od središta električnog luka. Također je na taj način moguće procijeniti koliki je prijenos topline s električnog luka na radni komad. Zbog toga pri korištenju argona (koji ima relativno nisku toplinsku vodljivost) kao zaštitnog plina dolazi do formiranja električnog luka u kojem se jasno može razlikovati dvije zone, uska jezgra u kojoj dolazi do visokih temperatura i znatno hladnija vanjska zona što rezultira penetracijskim profilom zavara s uskim korijenom i širim vrhom. Ukoliko se koristi plin s nižom toplinskom vodljivošću, jezgra električnog luka postaje šira rezultirajući ravnomjernijom raspodjelom temperature po njegovom presjeku. Iz tog razlog, profil zavara je u tom slučaju širi i s manjom penetracijom [4].

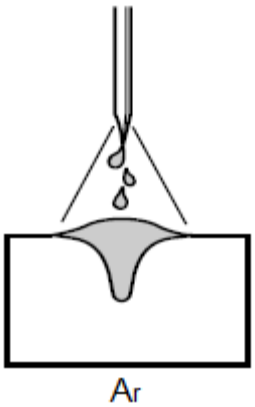
Najčešće korišteni plinovi kod MAG postupka zavarivanja grupirani prema normi EN ISO 14175:2008 prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Podjela zaštitnih plinova za MAG zavarivanje prema EN ISO 14175:2008 normi [19]

Grupa	Podgrupa	Udio komponente u postocima [%]				
		CO_2	O_2	Ar	H_2	
M1	1	$0,5 \leq CO_2 \leq 5$	-	ostatak	$0,5 \leq H_2 \leq 5$	visokolegirani čelici
	2	$0,5 \leq CO_2 \leq 5$	-	ostatak	-	
	3	-	$0,5 \leq O_2 \leq 3$	ostatak	-	
	4	$0,5 \leq CO_2 \leq 5$	$0,5 \leq O_2 \leq 3$	ostatak	-	
M2	0	$5 \leq CO_2 \leq 15$	-	ostatak	-	niskolegirani čelici
	1	$15 \leq CO_2 \leq 25$	-	ostatak	-	
	2	-	$3 \leq O_2 \leq 10$	ostatak	-	
	3	$0,5 \leq CO_2 \leq 5$	$3 \leq O_2 \leq 10$	ostatak	-	
	4	$5 \leq CO_2 \leq 15$	$0,5 \leq O_2 \leq 3$	ostatak	-	
	5	$5 \leq CO_2 \leq 15$	$3 \leq O_2 \leq 10$	ostatak	-	
	6	$15 \leq CO_2 \leq 25$	$0,5 \leq O_2 \leq 3$	ostatak	-	
	7	$15 \leq CO_2 \leq 25$	$3 \leq O_2 \leq 10$	ostatak	-	
M3	1	$25 \leq CO_2 \leq 50$	-	ostatak	-	
	2	-	$10 \leq O_2 \leq 15$	ostatak	-	
	3	$25 \leq CO_2 \leq 50$	$2 \leq O_2 \leq 10$	ostatak	-	
	4	$5 \leq CO_2 \leq 15$	$10 \leq O_2 \leq 15$	ostatak	-	
	5	$25 \leq CO_2 \leq 50$	$10 \leq O_2 \leq 15$	ostatak	-	
C	1	100	-	-	-	
	2	ostatak	$0,5 \leq O_2 \leq 30$	-	-	

4.2. Argon

Argon je jednoatomni kemijski inertni plin bez boje i mirisa, nije zapaljiv niti otrovan te nije topiv u talini metala. Za korištenje argona u procesu zavarivanja kao zaštitnog plina, potrebno je da ima čistoću veću ili jednaku 99,99 %. Argon u usporedbi sa zrakom ima 1,380 puta veću gustoću tako da u slučaju horizontalnog zavarivanja pruža jako dobru zaštitu. Zavarivanje u zaštiti argona rezultira talinom s visokom površinskom napetošću, brzim skrućivanjem taline i malim gubicima legirnih elemenata. Osim kao samostalno, argon se kao zaštitni plin može koristiti u dvo i višekomponentnim plinskim mješavinama i za zavarivanje kako metala na bazi željeza tako i neželjeznih legura (poput nikla, bakra, aluminija, magnezijskih legura i slično). Nizak ionizacijski potencijal argona uzrokuje izvrsnu stabilnost električnog luka i provodnost električne struje. Pri zavarivanju neželjeznih legura koristi se argon kao zaštitni plin u samostalnom obliku (jednokomponentni plin) i u tom slučaju pruža izuzetno stabilan električni luk i veliku penetraciju (Slika 19) i to u području zavarivanja štrcajućim lukom. Također se može koristiti i u slučaju zavarivanja tankostijenih konstrukcija kratkim spojevima. Ukoliko se zavaruju metali na bazi željeza uz argon se u plinsku mješavinu dodaju kisik (O_2), helij (He), ugljični dioksid (CO_2), vodik (H_2) i/ili dušik (N_2). Čisti argon skladišti se u boce u plinovitom ili tekućem stanju pod tlakom od 150 ili 200 bara. Boce su standardizirane i najčešće se koriste čelične boce zapremnine od 40 litara ili 50 litara [4].



Slika 19. Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti argona (Ar) [4]

4.3. Ugljični dioksid

Ugljični dioksid (CO_2) je dvokomponentni plin (sastoji se od dva elementa – ugljika i kisika u masenim odnosima 27,3 % ugljika i 72,7 % kisika) što ga razlikuje od svih ostalih korištenih plinova u svrhu zaštite zavarenog spoja. Kao i argon, također je bez boje i mirisa, neotrovan i nezapaljiv. Prilikom zavarivanja u zaštitnoj atmosferi koja sadrži CO_2 između rastaljenog metala i CO_2 dolazi do reakcije što ga svrstava u kategoriju aktivnih zaštitnih plinova. Primjena aktivnih plinova zahtijeva posebnu pažnju zbog pojave oksidacije.

Ugljični dioksid je većinom neaktivan/inertan plin pri sobnoj temperaturi ali pri zagrijavanju na više temperature, iznad 1600 ºC u električnom luku, CO_2 disocira na ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom [3]:

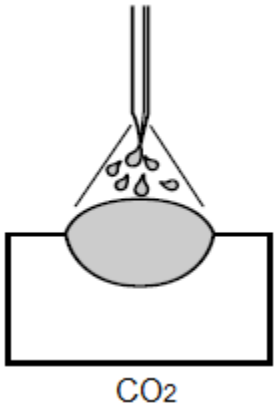
$$CO_2 \rightarrow CO + O$$

CO odlazi u atmosferu

$$Fe + O \rightarrow FeO$$

Zbog toga atmosfera električnog luka sadrži veću količinu kisika koji može reagirati s elementima iz taline. Da li će udio ugljika u metalu zavara biti povećan ili smanjen ovisi o udjelu ugljika u sastavu osnovnog metala i elektrode. Gubitak ugljika se pripisuje stvaranju CO zbog oksidirajuće karakteristike CO_2 zaštitnog plina pri višim temperaturama. Kada dođe do spomenute reakcije, CO može ostati zarobljen u metalu zavara kao poroznost. Štetno stvaranje oksida pri zavarivanju konstrukcijskih čelika može se uspješno spriječiti legiranjem dodatnog materijala (žice) dezoksidantima (Si, Mn) [4].

Ugljični dioksid kao zaštitni plin se najčešće koristi kada se zahtijeva prijenos metala u kratkim spojevima. CO_2 uz O_2 daje široki profil i duboku penetraciju zavara dok nizak potencijal ionizacije i niska toplinska vodljivost stvaraju vrlo visoke temperature u središtu električnog luka (jezgra). Visoke temperature jezgre tako utječu na ukupan zavar dajući mu jednolik profil dubine penetracije i širine zavara čime se mogu „pokriti“ eventualne netočnosti pripreme i vođenja pištolja (Slika 20) [4].



Slika 20. Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti ugljičnog dioksida (CO_2) [4]

Od zaštitnih plinova koji se koriste za zavarivanje ugljičnih čelika, CO_2 je jedini koji se može koristiti samostalno kao jednokomponentni zaštitni plin. Cijena CO_2 zaštitnog plina je relativno niska no zavari izvedeni u spomenutoj zaštiti zahtijevaju naknadnu obradu u vidu čišćenja površine od produkata prskanja kapljica. Manja učinkovitost deponiranja taline kod CO_2 zaštite, dim i prskanje povećavaju konačnu cijenu izvedenih zavara. Radi poboljšanja operativnih karakteristika, CO_2 se često miješa s argonom. Za zavarivanje se zahtijevaju čistoće CO_2 od minimalno 99,5 % / 99,7 %. CO_2 se skladišti u čeličnim bocama pod tlakovima između 70 i 100 bara i zapremnine najčešće 40 litara [4].

4.4. Kisik

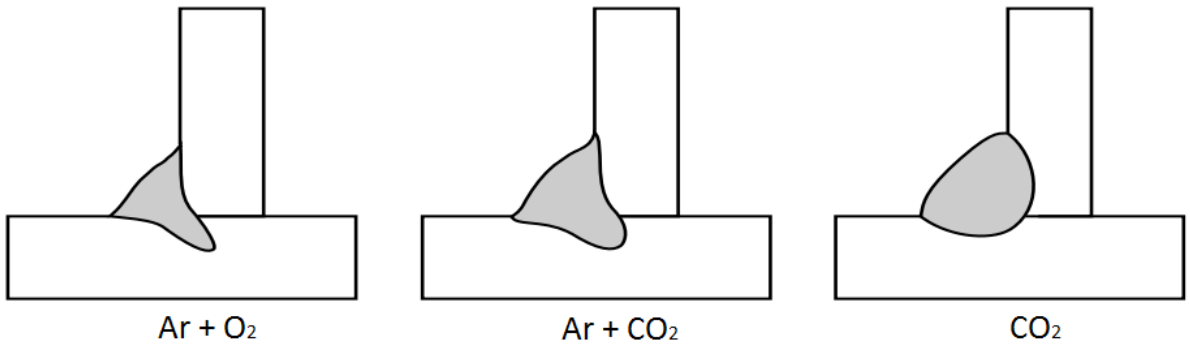
Kisik je plin koji u volumnom udjelu zauzima 50 % zemljane kore i 21 % atmosfere. Dobiva se ukapljivanjem i destilacijom zraka. Reaktivan je s gotovo svim elementima izuzev rijetkih i inertnih plinova. Bez boje je i mirisa, neotrovan i nezapaljiv, ali izrazito podržava gorenje. Zahvaljujući navedenim svojstvima, idealan je plin za povećanje temperatura plamena kod plinskog zavarivanja i rezanja. Primjena kisika kod zavarivanja povećava stabilnost električnog luka i smanjuje površinsku napetost. Dodavanjem od 1 % do 5 % O_2 smanjuje se promjer kapljica dodatnog metala, poboljšava se spajanje na rubovima, a površina zavara znatno je ravnija. Često se dodaje argonu kod MAG postupaka u svrhu povećanja stabilnosti luka i radi doprinosa kvašenju te obliku šava pri zavarivanju niskougljičnih i korozijski postojanih čelika. Također se upotrebljava za povećanje brzina kod rezanja plazmom i laserom. Međutim prisutnost kisika pri zavarivanju ima značajan utjecaj na mikrostrukturu materijala zavara, a time i na njegova osnovna mehanička svojstava, posebno

na udarni rad loma. Stoga se u zavarivanju uvodi pojam ekvivalenta kisika radi procjene utjecaja zaštitnog plina na svojstva zavara. Kisik se koristi samo u plinskim mješavinama, u malim postotcima [18].

4.5. Plinske mješavine

4.5.1. Dvokomponentne plinske mješavine

Dvokomponentne mješavine plinova kod MAG zavarivanja najčešće se javljaju u dva oblika, kao mješavina argona (Ar) i ugljičnog dioksida (CO_2) ili kao mješavina argona (Ar) i kisika (O_2). Ar - CO_2 su najčešće primjenjivane dvokomponentne plinske mješavine. Podržavaju sva četiri načina prijenosa materijala u električnom luku. Disociranjem CO_2 u električnom luku oslobađa se kisik koji daje talini dodatnu viskoznost i doprinosi stabilizaciji električnog luka. Svojom toplinskom vodljivošću CO_2 također utječe na veću širinu provara. Štrcajući prijenos materijala u električnom luku zahtijeva da količina CO_2 bude manja od 18 %. Porastom njegova udjela raste unos topline, a time i opasnost od izgaranja. Ar - CO_2 mješavine do 18 % CO_2 podržavaju također i impulsni način prijenosa materijala. Prijenos metala kratkim spojevima je način prijenosa s prilično niskim unosom topline, te se za nju koriste mješavine s udjelom CO_2 jednakim ili većim od 20 %. Kod primjene kratkih spojeva zahtijeva se opreznost ukoliko se upotrebljavaju veće količine argona [21]. Slika 21 pokazuje razlike u penetraciji kod dvokomponentnih plinskih mješavina u odnosu na čisti CO_2 dok tablica 7 daje uvid u njihova svojstva.



Slika 21. Razlike u penetraciji mješavina u odnosu na čisti CO_2 [6]

Tablica 7. Svojstva dvokomponentnih plinskih mješavina kod MAG zavarivanja [20]

Svojstva		Ar / CO_2	Ar / O_2	CO_2
Penetracija	položeno zavarivanje	dobra	dobra	dobra
	prisilni položaji	povećanjem volumnog udjela CO_2 se povećava	može postati kritična ako talina prethodi električnom luku	pouzdana
Toplinsko opterećenje elektrode		snižava se povećanjem razine CO_2	visoko; prekomjerna temperatura u električnom luku ograničava parametre	nisko zbog visoke toplinske vodljivosti plina
Stupanj oksidacije		viši s povećanjem razine CO_2	visok; npr. pri 8% O_2	visok
Poroznost		niža s povećanjem razine CO_2	visoki udio pora	niska mogućnost nastanka pora
Prskanje		više s povećanjem razine CO_2	nisko	najveće; povećava se povećanjem parametara
Unos topline		povećava s povećanjem razine CO_2	najniži	visok
Način prijenosa metala u električnom luku	kratki spojevi	da	da	da
	prijelazni luk	da	da	-
	štrcajući luk	da	da	-
	impulsni luk	da (do 20% CO_2)	da	-

Dodavanjem kisika argonu, prije svega, poboljšavaju se karakteristike električnog luka te povećava viskoznost taline zahvaljujući smanjenu površinske napetosti taline. Nadalje, kisik povećava oksidacijski potencijal luka, povećava unos topline, brzinu zavarivanja, stabilizira električni luk, kapljice pri prijenosu metala štrcajućim lukom su manje (ali se brže stvaraju), kisik također smanjuje prijelaznu jakost struje (kritičnu struju) kod prijenosa metala slobodnim letom kapljica i utječe na oblik zavarenog spoja. Uporaba ovih mješavina pokazala se vrlo korisnom pri brzom zavarivanju tankostijenih materijala. Ove mješavine se najčešće koriste kod zavarivanja ugljičnih i korozijski postojanih čelika [21].

U tablici 8 prikazane su uobičajene dvokomponentne plinske mješavine te njihova svojstva.

Tablica 8. Uobičajene dvokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [16]

Redni broj	Plinska mješavina	Način prijenosa materijala u električnom luku	Svojstva
1.	98 %Ar + 2% CO_2	štrcajući luk	velika brzina zavarivanja; za uporabu s elektrodama od ugljičnog i nehrđajućeg čelika
2.	95 %Ar + 5% CO_2	štrcajući luk	impulsni luk s elektrodama od ugljičnog čelika
3.	90 %Ar + 10% CO_2	štrcajući luk	za prijenos metala štrcajućim i impulsnim lukom kod ugljičnih čelika
4.	82 %Ar + 18% CO_2	štrcajući luk	popularna mješavina u Europi za zavarivanje širokog spektra debljine osnovnog materijala
5.	80 %Ar + 20% CO_2	kratki spojevi	još veće smanjenje prskanja taline pri zavarivanju

4.5.2. Trokomponentne plinske mješavine

Trokomponentne plinske mješavine primjenjuju se pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika, te u nekim slučajevima legura nikla. Za prijenos metala kratkim spojevima na ugljičnom čeliku, dodatak od 40 % helija u mješavinu argona i CO_2 dovodi do šireg profila zavara. Helij omogućuje veću toplinsku vodljivost za prijenos materijala kratkim spojevima pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika. Primjena ovih mješavina je česta kod zavarivanja nehrđajućih čelika. Kod korozijski postojanih čelika, primjena trokomponentnih mješavina je svakodnevna pojava. Udjeli helija od 55 do 90 % i 2,5 % CO_2 dodaju se argonu za prijenos materijala kratkim spojevima. Prednosti ovih mješavina su [21]:

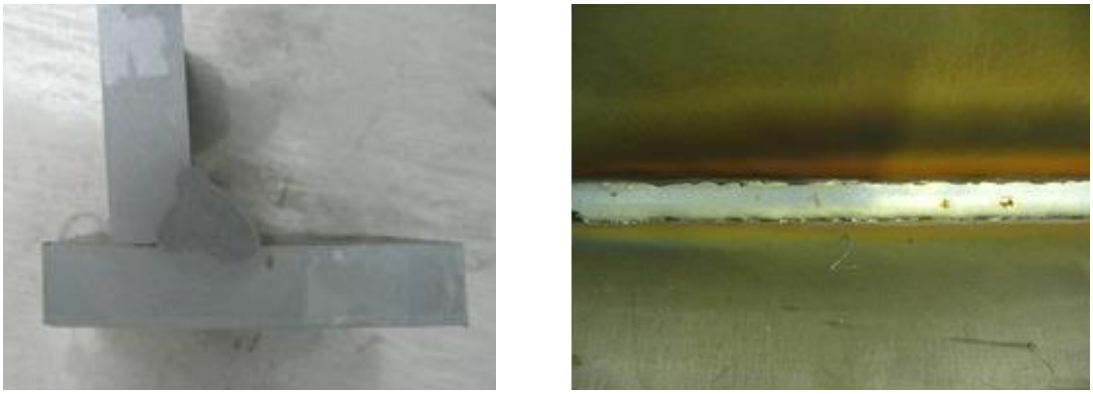
- smanjeno prskanje,
- poboljšana viskoznost taline,
- ravni i položeniji izgled zavara,
- stabilniji električni luk.

Argon s udjelom od 5 - 10 % CO_2 i sa 1 - 6 % O_2 uglavnom služi za zavarivanje ugljičnih, niskolegiranih čelika različitih debljina. Ove plinske mješavine primjenjuju se kada se traže dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva spomenutih vrsta osnovnog materijala. Na tankostijenim radnim komadima, udio kisika poboljšava stabilnost luka i smanjuje potrebnu jakost struje na 30 do 60 A, što omogućuje kratki i lako upravljivi električni luk i doprinosi smanjenju prekomjernog protaljivanja i izobličenja zbog smanjenog unosa topline u području zavara. Trokomponentne Ar - CO_2 - O_2 mješavine podržavaju prijenose materijala kratkim spojevima, štrcajućim lukom te impulsnim strujama za primjene na legiranim i niskolegiranim čelicima [21]. Prikaz uobičajenih trokomponentnih plinskih mješavina prikazan je u tablici 9.

Tablica 9. Uobičajene trokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [6]

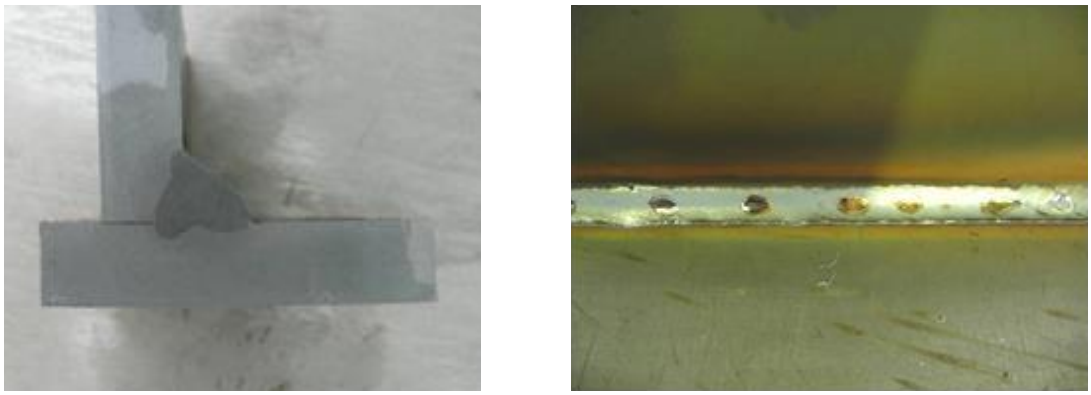
Redni broj	Plinska mješavina	Način prijenosa materijala u električnom luku	Svojstva
1.	90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO_2	kratki spojevi impulsni luk	najpopularniji za zavarivanje čelika kratkim spojevima, služi za zavarivanje osnovnog materijala debljeg od 1,6 mm od nehrđajućeg čelika i nikla impulsnim lukom, velike brzine pri zavarivanju nehrđajućeg čelika
2.	55% He + 42, 5% Ar + 2,5% CO_2	impulsni luk	mogućnost primjene pri zavarivanju nehrđajućih čelika i nikla kratkim spojevima, niži udio He omogućava mu primjenu i kod štrcajućeg luka
3.	38% He + 56% Ar + 6% CO_2	kratki spojevi	uporaba na ugljičnom čeliku i na niskolegiranim čelicima
4.	90% Ar + 8% CO_2 + 2% O_2	kratki spojevi štrcajući luk impulsni luk	za zavarivanje ugljičnih čelika, visok udio inertne komponente smanjuje prskanje

Primjer rezultata zavarivanja trokomponentnom plinskom mješavinom sa 93 % Ar + 6 % CO_2 + 1 % O_2 (*Ferroline C6 X1*) prikazan je na slici 22 uz odgovarajuće parametre zavarivanja dobivene prilikom primjene te trokomponentne plinske mješavine. Još jedan takav primjer prikazan je na slici 23 s trokomponentnom plinskom mješavinom sa 86 % Ar + 12 % CO_2 + 2 % O_2 (*Ferroline C12 X2)* [21].



Slika 22. Zavarivanje trokomponentnom plinskom mješavinom Ferroline C6 X1 [21]

- Struja zavarivanja: 260 A
- Napon: 29,9 V
- Brzina žice: 13,0 m/min
- Brzina zavarivanja: 32,0 cm/min
- Unos topline: 7,77 kJ/cm



Slika 23. Zavarivanje trokomponentnom plinskom mješavinom Ferroline C12 X2 [21]

- Struja zavarivanja: 260 A
- Napon: 32,0 V
- Brzina žice: 13,0 m/min
- Brzina zavarivanja: 32,0 cm/min
- Unos topline: 8,30 kJ/cm

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Uvod

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. U eksperimentalnom radu bilo je potrebno osmisliti plan pokusa kako bi se mogle usporediti karakteristike električnog luka u CBT prijenosu uz primjenu trokomponentnih plinskih mješavina sastava 93 % Ar, 1 % O_2, 6 % CO_2 te 86 % Ar, 2 % O_2, 12 % CO_2 na više razina unosa topline te analizirati dobivene rezultate i komentirati stabilnost prijenosa u području prijelaznog luka. Korišteni izvor struje za zavarivanje je Daihen Varstroj WB - P500L. Prijenos metala prvo se izveo navarivanjem u zaštitnoj atmosferi prvog plina (93 % Ar, 1 % O_2, 6 % CO_2) te potom u zaštitnoj atmosferi drugog plina (86 % Ar, 2 % O_2, 12 % CO_2) različitim načinima prijenosa metala (konvencionalni ili CBT) te na različitim razinama unosa topline (150 A, 175 A, 200 A).

5.2. Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje za zavarivanje WB – P500L kojeg je razvila i proizvela tvrtka Daihen Varstroj predstavlja najnoviju generaciju izvora struje za MAG zavarivanje i prvi je izvor struje za zavarivanje čiji je procesor (Welbee procesor) napravljen nano tehnologijom. Izvor struje i korisničko sučelje prikazani su na slikama 24 i 25. Tehničke karakteristike WB – 500L navedene su u tablici 10.

Slika 24. Izvor struje za zavarivanje WB - P500L

Na korisničkom sučelju (Slika 25) potrebno je odabrati određena podešavanja načina rada i parametre zavarivanja. U ovom slučaju odabrana debljina dodatnog materijala (puna žica) je 1,2 mm koje je načinjena od mekog čelika G 42 4 C/M 3Si1 (mod *MILD STEEL*). Pošto aparat nema mogućnosti točnog odabira plinova koji su korišteni u eksperimentu, uz prethodne probe i iskustvo zavarivača, odabran je mod *MAG (20 % CO_2)*. U odabiru metode zavarivanja za slučaj konvencionalnog načina prijenosa metala odabran je mod *DC*, dok je za zavarivanje CBT načinom prijenosa metala odabran mod *DC LOW SPATTER*.

Slika 25. Korisničko sučelje izvora struje WB – 500L

Tablica 10. Karakteristike izvora struje WB – 500L [22]

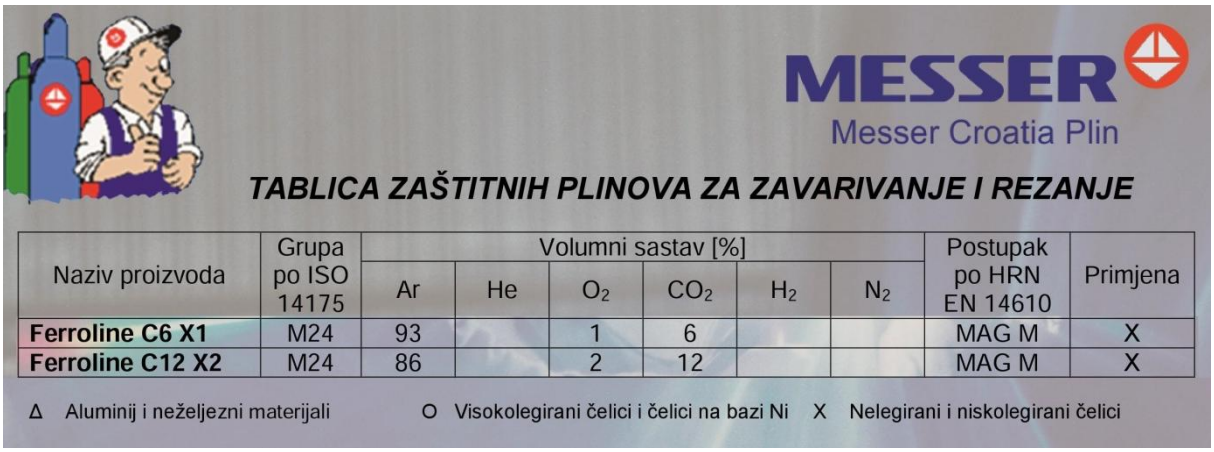
Izvor struje	**WB – P500L**	
Način rada	DC	Impulsno
Priključni napon [V]	400 +/- 15 %	
Nazivna ulazna snaga [kVA]	25	
Struja zavarivanja [A]	30 – 500	30 – 400
Napon zavarivanja [V]	12 – 39	12 – 34
Težina [kg]	83	
Dimenzije (Š×D×V) [mm]	395×710×592	

5.3. Zaštitni plin

S obzirom da se u eksperimentu ispitivao i utjecaj zaštitnog plina na svojstva zavara korištene su dvije vrste zaštitnog plina, odnosno plinske mješavine. Na taj način je bilo moguće analizirati njihov utjecaj na fiziku električnog luka, način prijenosa metala kao i strukturu zavara. U tu svrhu korišteni su sljedeći zaštitni plinovi:

- *Ferroline C6 X1* (93 % Ar – 1 % O_2 – 6 % CO_2),
- *Ferroline C12 X2* (86 % Ar – 2 % O_2 – 12 % CO_2).

Prema normi *HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke* imaju oznaku M24. Plinske trokomponentne mješavine namijenjene su zavarivanju nelegiranih i niskolegiranih čelika. Ove plinske mješavine prema normi HRN EN ISO 14175 prikazane su na slici 26.



Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav [%]						Postupak po HRN EN 14610	Primjena
		Ar	He	O_2	CO_2	H_2	N_2		
Ferroline C6 X1	M24	93		1	6			MAG M	X
Ferroline C12 X2	M24	86		2	12			MAG M	X

Δ Aluminij i neželjezni materijali O Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni X Nelegirani i niskolegirani čelici

Slika 26. Korišteni zaštitni plinovi [23]

5.4. Dodatni materijal

Dodatni materijal koji je korišten pri eksperimentalnom radu je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ-SG 2 te oznake G 42 4 C/M 3Si1 (prema normi *HRN EN ISO 14341:2012 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike:Razredba.*) promjera 1,2 mm. Slikom 27 je prikazana specifikacija dodatnog materijala koji je korišten u eksperimentu.

EZ - SG 2

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO_2 ili mješavine plinova Ar/CO_2. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični lijev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eL} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV

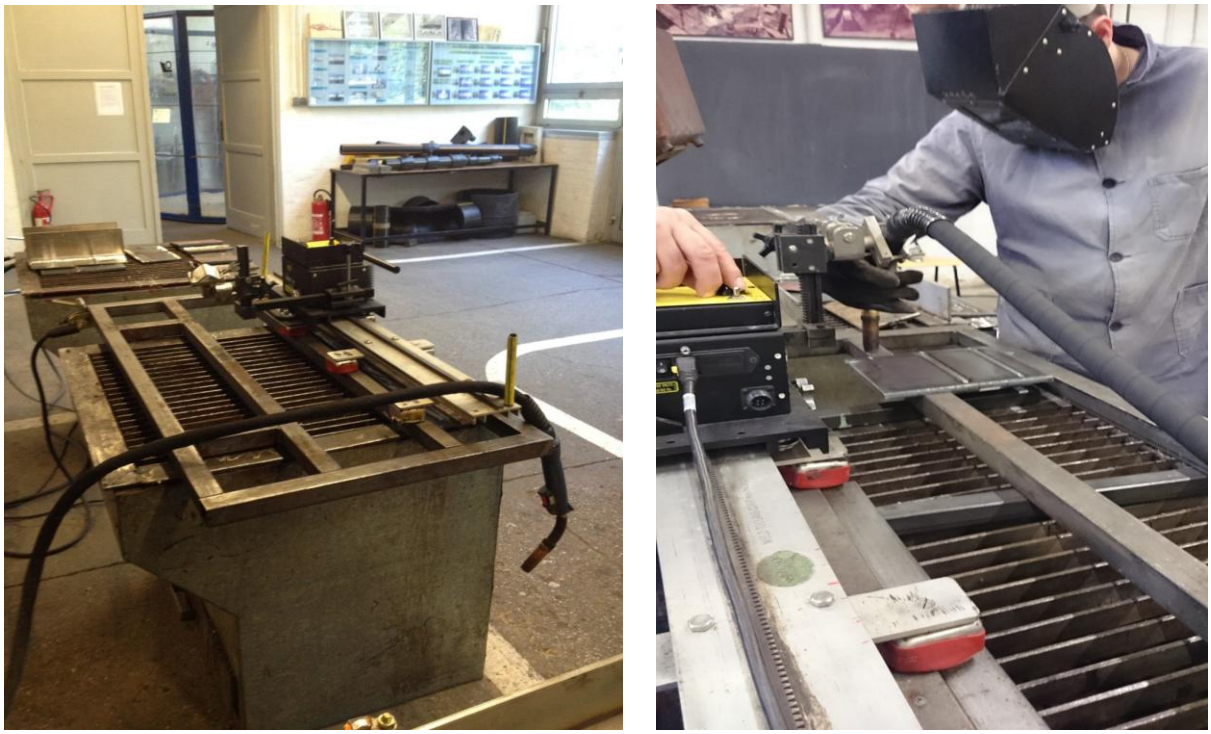
= +

Slika 27. Specifikacija dodatnog materijala [24]

5.5. Navarivanje

Postupak navarivanja provodio se automatskim „BUGO“ uređajem koji omogućava održavanje konstantne brzine zavarivanja. Brzina zavarivanja za sve navare iznosila je 30 cm/min. Nagib i položaja pištolja za sve uzorke bili su konstantni zato što razmak i nagib, ukoliko se razlikuju, mogu utjecati na rezultat zavarivanja. Slobodni kraj žice za sve uzorke iznosio je 15 mm. Navarivalo se je neutralnom tehnikom rada.

Na slici 28 prikazana je organizacija radnog mjesta i oprema kojom se je vršilo navarivanje.



Slika 28. Organizacija radnog mjesta i opreme

Navarivanje je provedeno na limovima od čelika oznake S235, dimenzija 300 x 200 x 10 mm. Pošto je trebalo usporediti dva različita plina na dva različita načina prijenosa metala te na tri razine unosa topline ukupno je trebalo izraditi 12 navara. U tablici 11 prikazane su oznake pojedinih navara koje će se koristiti u daljnjem dijelu rada.

Tablica 11. Oznake navara prema planu eksperimenta

Oznaka	Trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6 X1*	Trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C12 X2*	Konvencionalani način prijenosa metala	CBT način prijenosa metala	Jakost struje 150 A	Jakost struje 175 A	Jakost struje 200 A
1 - 1A	×		×		×		
1 - 2A	×		×			×	
1 - 3A	×		×				×
1 - 1B	×			×	×		
1 - 2B	×			×		×	
1 - 3B	×			×			×
2 - 1A		×	×		×		
2 - 2A		×	×			×	
2 - 3A		×	×				×
2 - 1B		×		×	×		
2 - 2B		×		×		×	
2 - 3B		×		×			×

Definiranjem osnovnog i dodatnog materijala, zaštitnog plina, načina prijenosa metala te ostalih parametara pristupilo se je samom procesu navarivanja uzoraka. Prvo se je provodilo zavarivanje u zaštiti trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*, a nakon toga u zaštiti *Ferroline C12 X2* plinske mješavine. Korišteni parametri zavarivanja uzoraka dani su u tablicama 12 i 13.

Prethodnim ispitivanjem utvrđeno je da je na višim jakostima struje od 200 A prisutno izrazito štrcanje i visoka nestabilnost električnog luka te je iz tog razloga odabrana za gornju granicu navarivanja jakost struje od 200 A. Tako će se navarivanje provoditi na tri razine unosa topline, na struji od 150 A, 175 A i 200 A.

Tablica 12. Parametri zavarivanja trokomponentnom plinskom mješavinom Ferroline C6 X1

Uzorak	Jakost struje [A]	Napon [V]	Način prijenosa metala [KV/CBT]	Očitane vrijednosti u toku zavarivanja		Brzina zavarivanja [cm/min]	Protok plina [l/min]	Unos topline [kJ/cm]
				Jakost struje [A]	Napon [V]			
1 - 1A	150	17,0	KV	141	17,2	30,0	17,0	4,08
1 - 2A	175	18,5	KV	171	18,0	30,0	17,0	5,18
1 - 3A	200	20,0	KV	205	19,5	30,0	17,0	6,40
1 - 1B	150	16,5	CBT	142	17,0	30,0	17,0	3,96
1 - 2B	175	17,5	CBT	171	17,3	30,0	17,0	4,90
1 - 3B	200	18,5	CBT	201	19,0	30,0	17,0	5,92

Unos topline računa se prema izrazu [4]:

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta$$

Gdje je:

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, mm/s

η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (MAG = 0,8).

Tablica 13. Parametri zavarivanja trokomponentnom plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

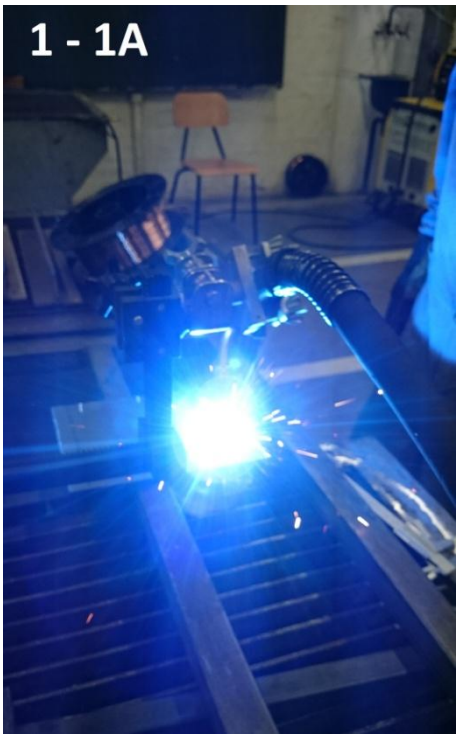
Uzorak	Jakost struje [A]	Napon [V]	Način prijenosa metala [KV/CBT]	Očitane vrijednosti u toku zavarivanja		Brzina zavarivanja [cm/min]	Protok plina [l/min]	Unos topline [kJ/cm]
				Jakost struje [A]	Napon [V]			
2 - 1A	150	17,0	KV	140	17,1	30,0	17,0	4,08
2 - 2A	175	18,5	KV	170	18,0	30,0	17,0	5,18
2 - 3A	200	20,0	KV	199	19,6	30,0	17,0	6,40
2 - 1B	150	16,5	CBT	146	17,0	30,0	17,0	3,96
2 - 2B	175	17,5	CBT	177	16,9	30,0	17,0	4,90
2 - 3B	200	18,5	CBT	197	19,0	30,0	17,0	5,92

Na slikama 29 i 30 prikazana je usporedba navarivanja konvencionalnim i CBT načinom prijenosa metala u atmosferi različitih zaštitnih plinova strujom jakosti 150 A. Za prvi slučaj navarivalo se je plinskom mješavinom *Ferroline C6 X1* dok se u drugom slučaju koristila plinska mješavina *Ferroline C12 X2*.

Usporedivši slike 29.a i 29.b vidljivo je da u slučaju konvencionalnog načina prijenosa metala postoji štrcanje i jasno je vidljivo, dok je kod CBT načina prijenosa metala štrcanje minimalno ili ga čak niti nema.

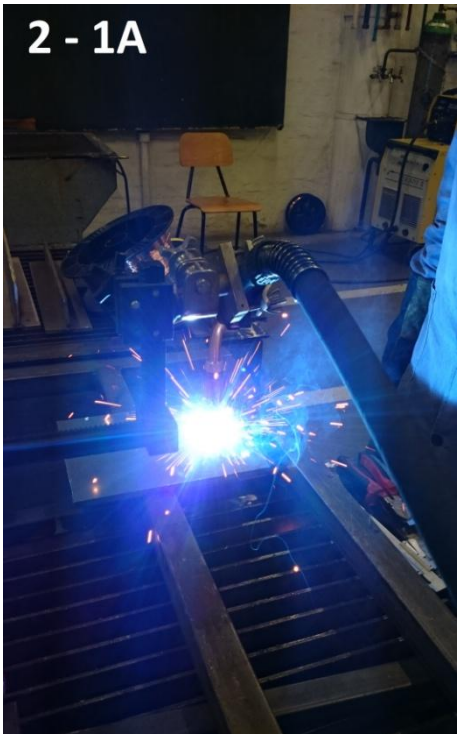
Slike 30.a i 30.b također pokazuju usporedbu konvencionalnog i CBT prijenosa metala. Kod konvencionalnog načina vidi se pojačanje štrcanja u odnosu na prethodni slučaj, jednako kao i kod CBT prijenosa metala.

Jakost struje imala je jednaka odstupanja kod obje vrste plina. Kod konvencionalnog načina očitana vrijednost odstupanja struje tijekom zavarivanja iznosila je oko 10 A manje od početno zadane struje, dok je kod CBT prijenosa odstupanje bilo za 5 A manje od početno zadane struje.



a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 29. Navarivanje strujom 150 A i plinskom mješavinom Ferroline C6 X1



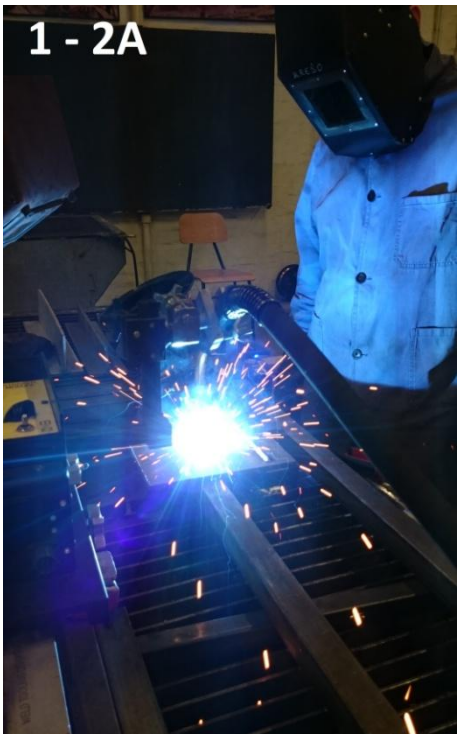
a) konvencionalno **b) CBT**

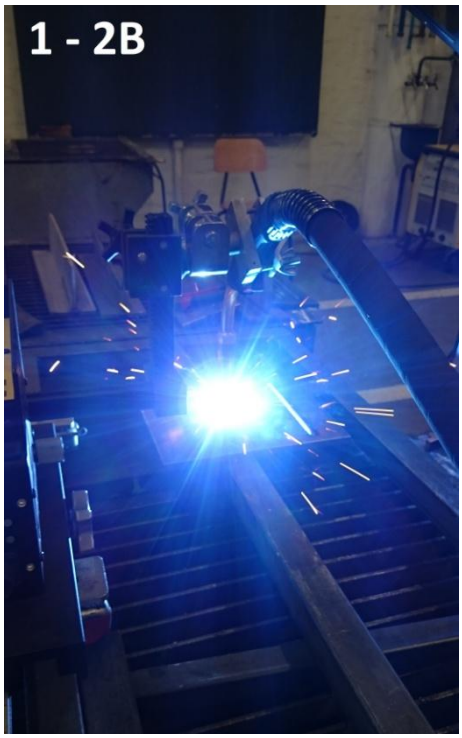
Slika 30. Navarivanje strujom 150 A i plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

Slike 31 i 32 prikazuju usporedbu navarivanja konvencionalnim i CBT načinom prijenosa metala u atmosferi različitih plinskih mješavina strujom jakosti 175 A. Uzorci 1 - 2A i 1 - 2B navarivani su plinskom mješavinom *Ferroline C6 X1* dok se za uzorke 2 - 2A i 2 - 2B koristila plinska mješavina *Ferroline C12 X2.*

Usporedivši sliku 31 s prethodnim slučajem (Slika 29), gdje se navarivalo istom plinskom mješavinom (*Ferroline C6 X1*), vidi se da je ovdje kada smo struju povisili za 25 A mnogo intenzivnije štrcanje i u konvencionalnom i u CBT načinu prijenos metala. Samim tim povećanjem struje, odnosno navarivanjem strujom od 175 A ulazi se u područje prijelaznog luka što je i glavni razlog povećanog štrcanja.

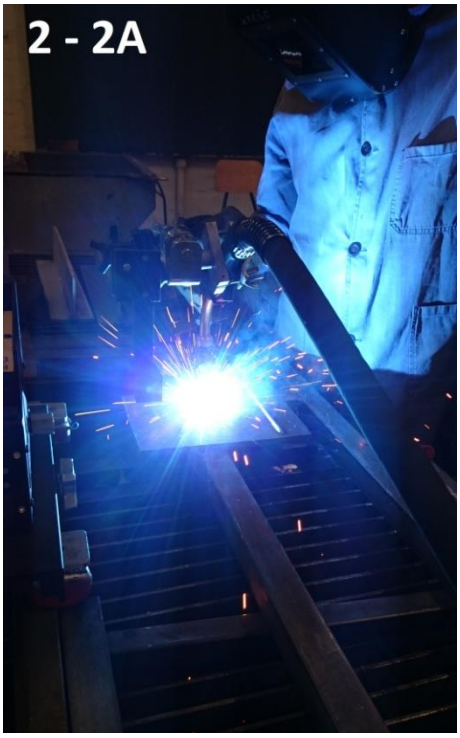
Uspoređujući slike 31 i 32 može se vidjeti da je na slici 32 štrcanje intenzivnije i u slučaju konvencionalnog i u slučaju CBT prijenosa metala čime se može zaključiti da plinska mješavina *Ferroline C12 X2,* odnosno mješavina s većim udjelom ugljikovog dioksida i kisika, ima lošije karakteristike pri ovoj jakosti struje te izaziva djelomičnu nestabilnost električnog luka.





a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 31. Navarivanje strujom 175 A i plinskom mješavinom Ferroline C6 X1



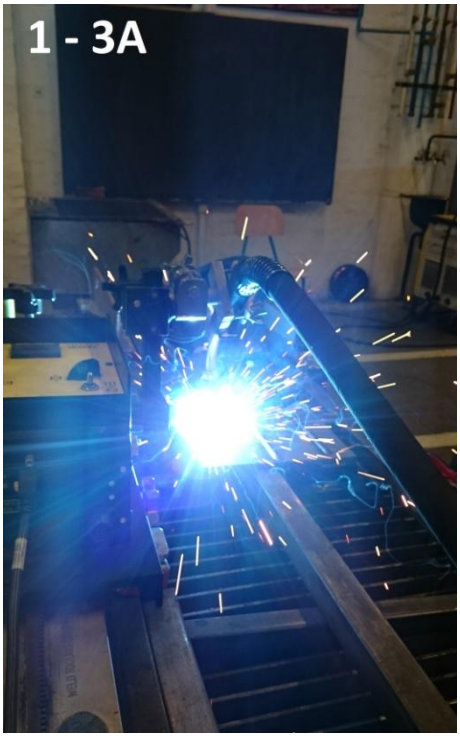
a) konvencionalno **b) CBT**

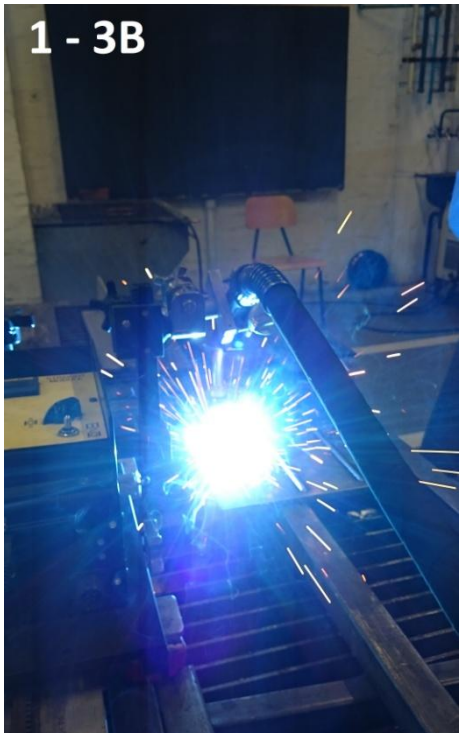
Slika 32. Navarivanje strujom 175 A i plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

Povisivši jakost struje navarivanja na 200 A ušlo se je u područje djelovanja prijelaznog luka. Došlo je do pojave većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu, a kao posljedica toga došlo je do pojave kratkih spojeva koji uzrokuju izrazito i nepredvidivo štrcanje.

Na slici 33 usporedbom konvencionalnog i CBT načina prijenosa metala u zaštiti *Ferroline C12 X2* plinske mješavine ne primjećuje se više velika razlika u štrcanju. Jedan i drugi imaju izraženo štrcanje te nestabilan električni luk nastao kao posljedica gore spomenutog prijelaznog luka i pojave kratkih spojeva.

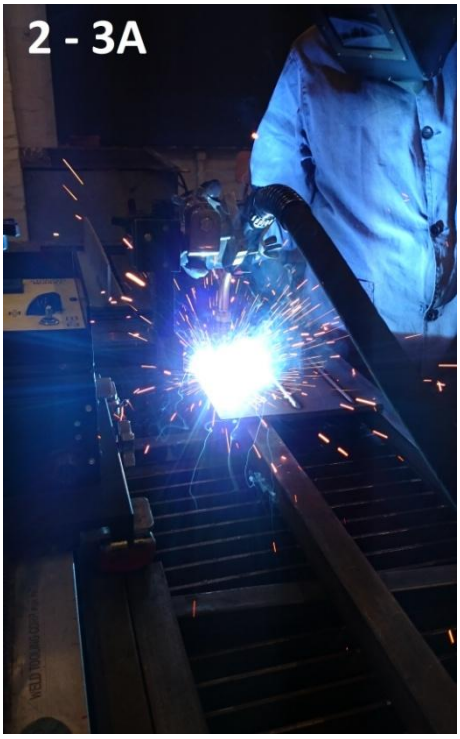
Uspoređujući slike 33 i 34 vidljivo je da su za slučaj zavarivanja u zaštiti *Ferroline C12 X2* plinske mješavine nestabilnost električnog luka i intenzivnost štrcanja više izraženi nego u slučaju zavarivanja *Ferroline C6 X1* plinskom mješavinom.

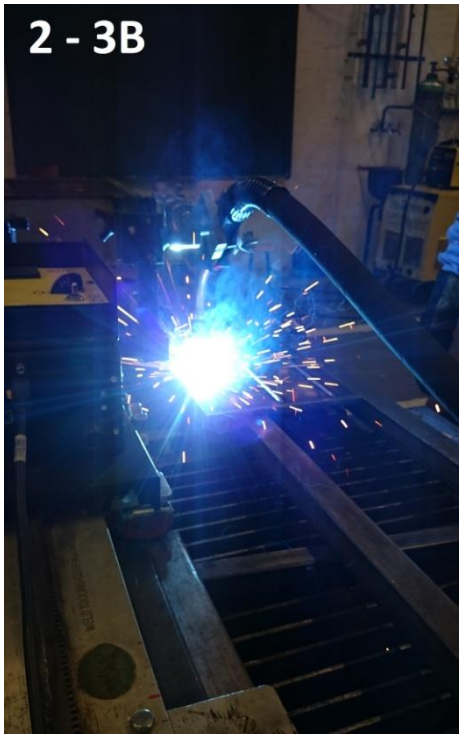




a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 33. Navarivanje strujom 200 A i plinskom mješavinom Ferroline C6 X1





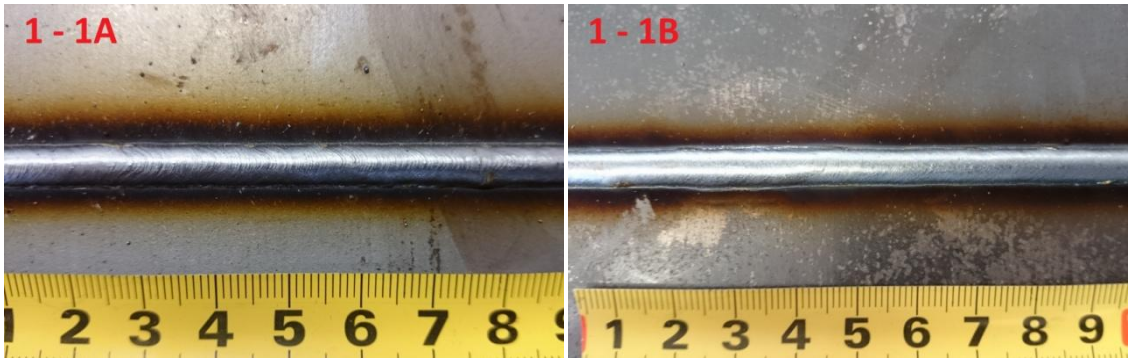
a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 34. Navarivanje strujom 200 A i plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

5.6. Analiza rezultata

Pregledom i analizom navara mogu se usporediti karakteristike konvencionalnog način prijenosa metala (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) i prijenosa metala pri CBT MAG zavarivanju te njihova usporedba i djelovanje pri zaštiti *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* plinskih mješavina.

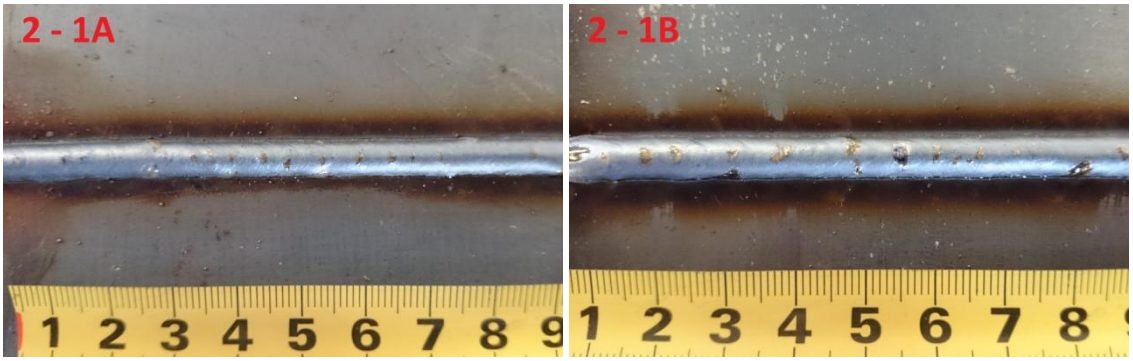
Navarivanje strujom od 150 A u zaštiti *Ferroline C6 X1* plinskih mješavina kod konvencionalnog načina prijenosa metala (Slika 35.a) primjećuje se lagano štrcanje kapljica metala zavara što kod CBT prijenosa metala (Slika 35.b) nije slučaj. Kod konvencionalnog se također primjećuje šira zona zacrnjenja oko zavara nego što je to kod CBT načina, dok se kod CBT-a vidi ravnomjernija i glađa površina zavara.



a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 35. Navarivanje strujom 150 A i plinskom mješavinom Ferroline C6 X1

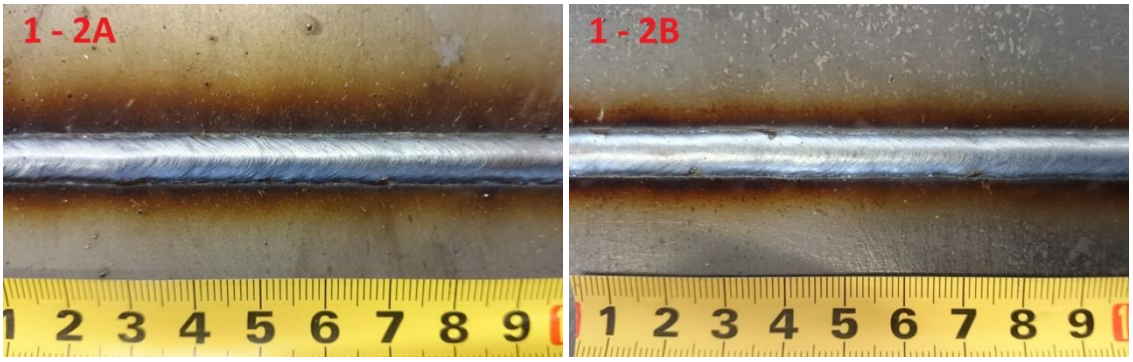
Na slici 36 (struja 150 A i plinska mješavina *Ferroline C12 X2*) odmah je uočljiva pojava troske na navarima. Pošto ova plinska mješavina sadrži veći udio ugljičnog dioksida i kisika dolazi do stvaranja većeg oksidacijskog potencijala što rezultira pojavom već spomenute troske. Kod konvencionalnog načina prijenosa metala (Slika 36.a) primjećuje se lagano štrcanje kapljica metala zavara dok je CBT prijenosom metala (Slika 36.b) to izbjegnuto i ne uočavaju se nikakve kapljice.



a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 36. Navarivanje strujom 150 A i plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

Na slici 37 (struja 175 A i plinska mješavina *Ferroline C6 X1*) kod konvencionalnog načina prijenosa metala vidi se lagana pojava štrcanja, šira je zona zacrnjenja oko zavara te grublja površina zavara nego što je to kod CBT načina. Kod CBT-a se primjećuje potpuna stabilnost električnog luka i nema nikakve pojave štrcanja što bi značilo da su odabrani dobri parametri rada i vrsta zaštitnog plina.

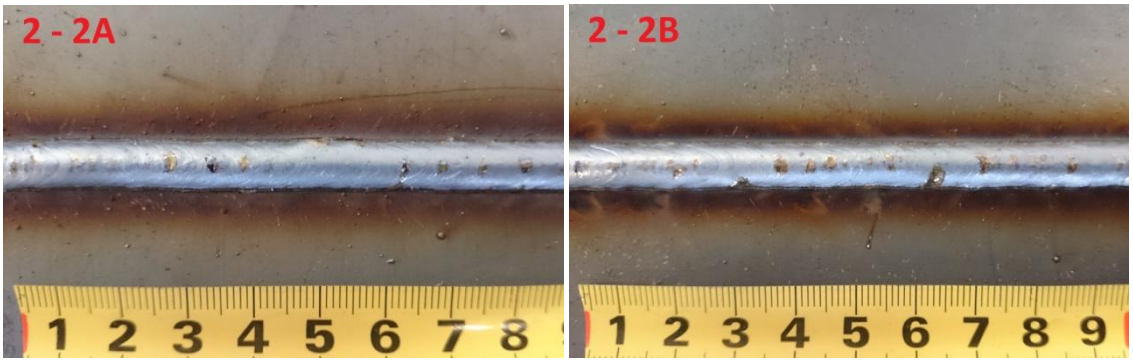


a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 37. Navarivanje strujom 175 A i plinskom mješavinom Ferroline C6 X1

Navarivanje strujom od 175 A u zaštiti *Ferroline C12 X2* plinske mješavine kod konvencionalnog načina prijenosa metala (Slika 38.a) primjećuje se veća količina štrcanja oko navara što je posljedica nestabilnosti električnog luka. Također se vidi povećanje nastale troske u odnosu na zavarivanje sa 150 A (Slika 36). Ta troska su zapravo izlučeni manganovi i silicijevi oksidi koji nastaju kao posljedica povećanja udjela ugljikovog dioksida i kisika u plinskoj mješavini. Uočava se da je površina navara kod ove plinske mješavine znatno ravnija i glađa a to je, kako je u uvodnom djelu rada spomenuto, razlog dodavanju većeg udjela kisika

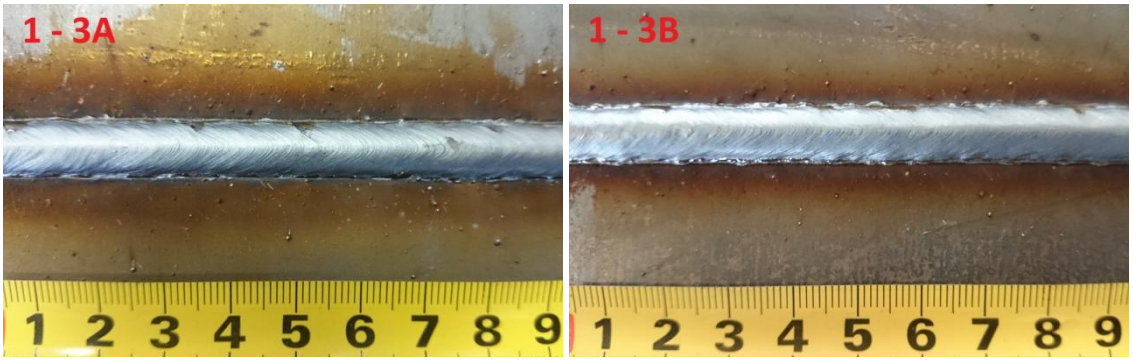
u mješavinu. Dodavanjem kisika smanjuje se promjer kapljice dodatnog materijala, a poboljšava se i spajanje metala navara i osnovnog materijala na rubovima.



a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 38. Navarivanje strujom 175 A i plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

Na slici 39 (struja 200 A i plinska mješavina *Ferroline C6 X1*) i kod konvencionalnog i kod CBT načina prijenosa metala uočava se nestabilnost električnog luka. Povišenjem jakosti struje zavarivanja na 200 A ušlo se je u područje djelovanja prijelaznog luka. Došlo je do pojave većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu, a posljedica toga je teška kontrola električnog luka te dolazi do pojave kratkih spojeva koji uzrokuju izrazito i nepredvidivo štrcanje. Kod CBT načina količina prskotina oko navara je manja. Nema pojave troske na površini navara pošto ova plinska mješavina ima niži ekvivalent kisika.

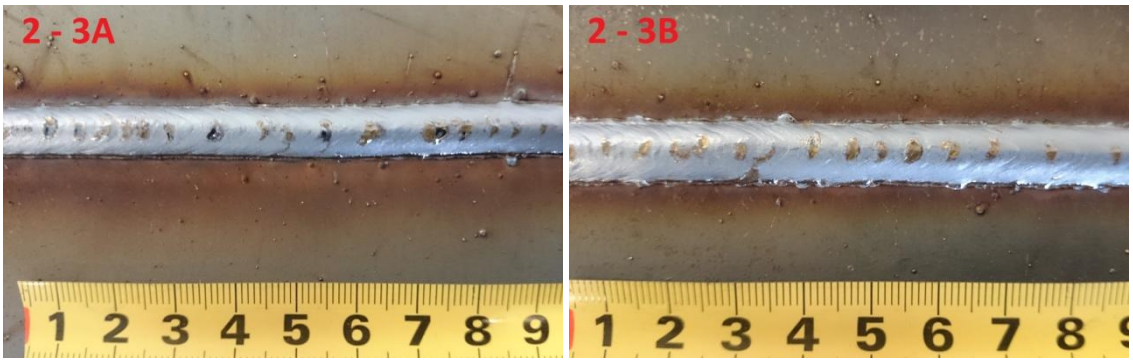


a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 39. Navarivanje strujom 200 A i plinskom mješavinom Ferroline C6 X1

Navarivanjem u zaštiti *Ferroline C12 X2* plinske mješavine i strujom 200 A (Slika 40) nestabilnost električnog luka i količina štrcanja više su izraženi nego u slučaju navarivanja u

zaštiti *Ferroline C6 X1* plinske mješavine. Povećanjem udjela CO_2 kao aktivne komponente zaštitnog plina nije se uspio postići stabilniji prijenos metala i općenito stabilniji proces zavarivanja već se je postigla veća količina štrcanja. CBT način prijenosa metala uspio je donekle kompenzirati tu količinu štrcanja. Navari u ovom slučaju imaju manje nadvišenje nego kod navarivanja sa *Ferroline C6 X1*. Razlog tome je udio od 2 % O_2 u kemijskom sastavu plinske mješavine *Ferroline C12 X2* koja daje veću viskoznost talini zavara. Također se vidi povećanje nastale troske u odnosu na zavarivanje sa 175 A (Slika 38).



a) konvencionalno **b) CBT**

Slika 40. Navarivanje strujom 200 A i plinskom mješavinom Ferroline C12 X2

6. ZAKLJUČAK

MAG postupak zavarivanja u današnje vrijeme predstavlja najrašireniji postupak zavarivanja i to se sigurno u dogledno vrijeme neće promijeniti. Baš zbog njegove raširenosti i česte uporabe teži se usavršavanju postupka kroz proučavanje parametara zavarivanja i izbora zaštitnog plina te njihova djelovanja na kvalitetu i mehanička svojstva zavarenog spoja.

MAG CBT je modificirani postupak zavarivanja kojim se žele ukloniti nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima tj. konvencionalnim načinom i povećati produktivnost. Najveći nedostatak konvencionalnog načina prijenosa metala je pojava štrcanja te se ona uspješno smanjuje ili uklanja pomoću MAG CBT prijenosa metala. Smanjenje pojave štrcanja se postiže novorazvijenim, visokopreciznim i visokobrzinskim Welbee mikroprocesorom. Welbee mikroprocesor omogućuje precizno predviđanje pojave električnog luka, smanjeni unos topline i formiranje rastaljene kapljice pomoću precizne regulacije duljine električnog luka.

Usporedbom konvencionalnog i modificiranog CBT MAG zavarivanja uočavaju se prednosti CBT postupka na nižim strujama zavarivanja. Povišenjem jakosti struje zavarivanja na 175 A kod konvencionalnog načina ulazi se u područje djelovanja prijelaznog luka dok je kod CBT-a to primjetno na 200 A. Dolazi do pojave većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu, a posljedica toga je teža kontrola i nestabilnost električnog luka te dolazi do pojave kratkih spojeva koji uzrokuju pojačano i nepredvidivo štrcanje.

Ferroline C6 X1 (93 % Ar – 1 % O_2 – 6 % CO_2) plinska mješavina pokazala je bolje rezultate pri vizualnoj kontroli kvalitete površine jer na površini navara izvedenog pod njenom zaštitom nije uočena troska i bilo je znatno manje prskotina. Pojave troske na površini navara nije bilo jer ova plinska mješavina ima niži oksidacijski potencijal.

Ferroline C12 X2 (86 % Ar – 2 % O_2 – 12 % CO_2) plinska mješavina sadrži veći udio ugljičnog dioksida i kisika te dolazi do stvaranja većeg oksidacijskog potencijala što rezultira pojavom poroznosti i troske. Uočava se da je površina navara kod ove plinske mješavine znatno ravnija i glađa a to je, kako je u uvodnom djelu rada spomenuto, razlog

dodavanju većeg udjela kisika u mješavinu. Dodavanjem kisika smanjuje se promjer kapljice dodatnog materijala, a poboljšava se i spajanje metala navara i osnovnog materijala na rubovima. Navari u ovom slučaju također imaju manje nadvišenje nego kod navarivanja sa *Ferroline C6 X1*. Razlog tome je udio od 2 % O_2 u kemijskom sastavu plinske mješavine *Ferroline C12 X2* koji daje veću viskoznost talini navara.

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća razvoj plinskih mješavina za MAG zavarivanje, što dvokomponentnih, što trokomponentnih, znatno raste. Razlog tome je poboljšanje kvalitete izvedbe zavarenih spojeva, kraće vrijeme zavarivanja u prisilnim položajima, bolja penetracija te zadnje, ako ne i najvažnije, smanjenje cijena plinskih mješavina. Trokomponentne plinske mješavine na osnovi argona i CO_2 pokazuju prednost nad konvencionalnim dvokomponentnim plinskim mješavinama na istoj osnovici, upravo u svim gore navedenim parametrima osim u cijeni. Naime, cijena tehničkog plina argona je i do tri puta veća od cijene CO_2, što je još uvijek značajniji razlog ne tako česte primjene trokomponentnih plinskih mješavina. Međutim, što je isplativo je vrlo često širok pojam upravo zbog različitosti uvjeta u proizvodnji diljem svijeta kao i eksploatacijskih uvjeta pojedinog zavarenog spoja na nekom proizvodu.

LITERATURA

[1] Babić, Nikola: Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[2] Garašić, I.; Kožuh, Z.; Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju, Zavarivanje vol. 57, str. 85 – 92, Zagreb, 2014.

[3] Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[4] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[5] Kralj, Slobodan: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[6] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf, dostupno 19.01.2016.

[7] Shinagawa, K.: Essential factors in gas metal arc welding, Kobe Steel LTD, 4. izdanje, Tokio, 2011.

[8] http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt, dostupno 23.01.2016.

[9] Bajs, Marko: Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[10] Guidelines for Gas Metal Arc Welding, https://www.millerwelds.com/~/media/miller%20electric/files/pdf/resources/bookspamphlets/mig_handbook.pdf, dostupno 23.01.2016.

[11] http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig1_4.htm, dostupno 23.01.2016.

[12] O`Brien, A. (Ed.): Welding handbook (9th edition) Volume 2, Welding processes; American Welding Society, Miami, USA, 2004.

[13] Rudan, Marijan: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. seminar, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 24.05.2007.

[14] Era, T.; Ide, A.; Uezono, T.; Ueyama T.; Hirata, Y.: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining, Welding International, 27:4, 268-273, 2013. (http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/09507116.2011.606152)

[15] Era, T.; Ide, A.; Uezono, T.; Ueyama T.; Yamamoto, H.: Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, IIW Doc. No. XII-1900-06, 2006.

[16] Era, T.; Uezono, T.; Ueyama, T.; Yamamoto, H.: Development of AC GMA welding system using controlled bridge transfer process, IIW Doc.No. WII-1937-08, 2008.

[17] Era, T., Uezono, T., Kadota, K., Hata, S., Ueyama, T.: Leading edge of current waveform control technology on digital inverter controlled welding power source and its peripheral equipment; Zavarivanje 57, 1/2, 5-16, 2014.

[18] Kolednjak, Davor: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.

[19] Norma EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke i njihovu primjenu

[20] http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases_.pdf, dostupno 11.02.2016.

[21] Levačić, Lidija: Trokomponentne plinske mješavine za MAG zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[22] http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2586, dostupno 12.02.2016.

[23] http://www.messer.hr/products/castolin/tabzavrez.pdf, dostupno 13.02.2016.

[24] http://www.elektroda-zagreb.hr/proizvodi/zice.html, dostupno 13.02.2016.

PRILOZI

I. CD-R disc - PDF verzija završnog rada